

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE DOBLADO EN DIFERENTES CONDICIONES Y MATERIALES PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Autor: María Guillén Pelayo

Tutores: Aida Estévez Urrea y Carpóforo Vallellano Martín

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE DOBLADO EN DIFERENTES CONDICIONES Y MATERIALES PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Autor:
María Guillén Pelayo

Tutores:
Aida Estévez Urra,
Profesora colaboradora
Carpóforo Vallellano Martín,
Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS DE DOBLADO EN DIFERENTES CONDICIONES Y
MATERIALES PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Autor: María Guillén Pelayo

Tutores: Aida Estévez Urra y Carpóforo Vallellano Martín

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

*De la manera más especial posible
quiero dedicarle este Trabajo de Fin de Grado
a mi profesora y tutora de proyecto, Aida.
Simplemente porque has sido la ingeniera
de la técnica y del corazón
que lleva consigo todo el trabajo plasmado
en estas páginas.*

*A Marcos,
por su constante ayuda desinteresada,
por su dulzura a la hora de explicar las cosas,
por esas charlas de taller que cundían más que estar sentada un cuatrimestre entero en un pupitre.*

*A los maestros de taller Manuel y Antonio,
por todas las sonrisas de buenos días a las nueve de la mañana,
por el clima de trabajo fomentado en el taller,
por sus continuas disposiciones a la hora tender las manos,
esas manos que han dotado a la parte experimental de este proyecto de la fuerza suficiente,
de la que yo a veces carecía.*

*A mi profesor titular Corpóforo,
por brindarme la oportunidad y confiar en mí a la hora de realizar este trabajo,
por llenarme de conocimiento y sabiduría e introducirme en el mundo del análisis experimental.*

*A mi padre Agustín y a mi mejor amiga Laura,
por esas subidas de ánimo con las palabras adecuadas en mis momentos más inadecuados.*

*A mi novio Manuel,
por su paciencia, apoyo moral y cariño,
por aguantar todo tipo de estado de ánimo experimentado mientras llevaba a cabo este trabajo,
porque sin saber ingeniería has sido el sustento de este proyecto sólo por tu condición incondicional.*

*Y mi madre Chiqui,
porque simplemente no existe verdad más grande
que lo que no se hace por una hija aún no está escrito.*

*En general también quiero dedicar este proyecto a todos los que algún día, en algún momento de sus
vidas, decidan echarle un vistazo a todas estas páginas. Decirles que con trabajo, sacrificio y
constancia, todo lo que uno es capaz de proponerse, se consigue.*

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Tareas a desarrollar	2
 2. Procesos de deformación plástica.....	5
2.1 Comportamiento mecánico de los materiales	5
2.2 Deformaciones plásticas como proceso de deformación	9
2.3 Procesos de deformación en masa.....	11
2.3.1 Forja y estampación.....	12
2.3.2 Laminación.....	12
2.3.3 Extrusión.....	13
2.3.4 Estirado.....	15
2.4 Procesos de deformación de chapa	15
2.4.1 Corte	16
2.4.2 Embutición.....	17
2.4.3 Estampado y estirado	17
2.4.4 Hidroconformado	18
2.5 Procesos de doblado	19
2.5.1 Doblado al aire.....	21
2.6 Procesos de doblado en V	22
2.6.1 Radio mínimo de doblado.....	24
2.6.2 Fuerza de doblado	24
2.6.3 Longitud de chapa desplegada	25
2.6.4 Recuperación elástica	28
2.6.5 Equipamiento de doblado	36
2.6.6 Tensiones residuales y defectos en las piezas	37
 3. Parte experimental	39
3.1 Equipos	39
3.1.1 Equipos para el procesos de doblado en V	39
3.1.2 Equipos para el corte de probetas	42
3.1.3 Equipos de medición	44
3.2 Materiales.....	46
3.2.1 Acero	46
3.2.2 Aluminio	50
3.2.3 Titanio.....	55
3.3 Probetas.....	57
3.4 Variables Experimentales	62
3.5 Realización de los ensayos.....	64

4. Análisis de resultados	65
4.1 Análisis teórico del doblado en V	65
4.1.1 Análisis general del ángulo de recuperación	65
4.1.2 Análisis de la recuperación elástica positiva.....	67
4.2 Análisis de resultados experimentales según ángulo de doblado	67
4.2.1 Acero DC01	67
4.2.2 Aluminio 2024T3 (t = 1,2 mm)	71
4.2.3 Aluminio 2024T3 (t = 1,6 mm)	72
4.2.4 Aluminio 1050H14	75
4.2.5 Aluminio 7075T6.....	78
4.2.6 Titanio 6Al-4V	80
4.3 Análisis de resultados experimentales según radio de doblado	82
4.4 Análisis de resultados experimentales en probetas pretensadas.....	84
4.4.1 Análisis teórico del doblado en V	84
4.4.2 Ensayo de pretensado	86
4.4.3 Medición de las deformaciones	88
4.4.4 Preparación de las probetas para el ensayo de doblado	90
4.4.5 Realización de los ensayos de doblado y análisis de resultados	91
4.5 Análisis de resultados experimentales en probetas recocidas	94
5. Propuesta de Práctica	99
6. Conclusiones.....	104
6.1 Conclusiones Generales.....	104
6.2 Acero	104
6.3 Aluminio	105
6.4 Titanio	106
7. Trabajos Futuros	107
8. Bibliografía	108
 Anexo I. Códigos Matlab empleados.....	 114
Anexo II. Representacion gráfica de los angulos de recuperación elástica	115
Anexo III. Análisis en profundidad del radio de doblado	125

Capítulo 1.

Introducción

*El límite de la mente humana
comienza en pensar
que existe límite.
María Guillén*

1.1 Antecedentes

La tecnología de conformación por deformación nace en el Neolítico sin ninguna base teórica, y posiblemente sin la conciencia de realmente a lo que llegaría, en siglos posteriores, el desarrollo de la tecnología del instinto de supervivencia. En la actualidad, los procesos de conformación por deformación se caracterizan, generalmente, por ser procesos de alta productividad, con bajos costes de producción por pieza, con bajo consumo de material, con cualidades del producto diseñadas especialmente para su función, con tolerancias estrechas, con posibilidad de geometrías complejas en sus productos finales, de control en las propiedades mecánicas de los productos, de alta calidad en los resultados y de deliberada disminución de energía. Entre otras características, la tecnología de deformación moderna emergió con énfasis en aspectos de precisión, control y seguridad de procesos. (Lange, 1997)

Los procesos de conformación de chapa han alcanzado una gran importancia en el mundo de la industria, colocando la chapa en diversidad de ocasiones como material base en productos industriales y de consumo, debido a su fácil maleabilidad, entre otras propiedades. Estos procesos abarcan desde el sector aeroespacial, pasando por el sector electrónico, el de herramientas de máquinas, el transporte, entre otros, teniendo en cuenta aspectos como la funcionalidad y lo estético. En la actualidad, las exigencias en el mundo de la industria crecen, debido a la alta competitividad que existe en este campo. Las empresas productoras de componentes de chapa deben obtener suficiente flexibilidad de producción, en el menor tiempo posible y con calidades aceptables. La tecnología crece de forma exponencial, remitiéndose a datos verídicos como lo son que en el pasado, en la industria del sector del automóvil, se introducían tres modelos nuevos cada diez años; mientras que ahora, se introducen diez modelos nuevos cada tres años. (Tekkaya, 2000)

Se observa que el problema en las industrias de producción de chapa está relacionado con la exigencia del cliente en obtener piezas cada día más complejas y con tolerancias geométricas cada vez más estrechas. Provocando con todo ello el desarrollo de defectos y fallos que se intentarán combatir con el diseño de un número muy elevado de parámetros,

propios de cada proceso de deformación de chapa. Entre estos parámetros destaca la relación entre el espesor inicial de la chapa y el radio de la herramienta de conformado. (Vallellano Martín, Marínez Donaire, Morales Palma, & García-Loma, 2010) También existen otros estudios de este tipo tales como la predicción de fallo en el conformado plástico de chapa mediante criterios de fractura dúctil. (Vallellano Martín, Erce Montilla, & García-Lomas Jung, 2004)

Por otro lado, el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación como el corte por láser, el corte por chorro de agua, etc., también han influido, pues estos procesos de fabricación también son adecuados para la fabricación de productos de chapa con formas complejas y de forma irregular. (Vasile, Vasile, Thamodhara, & Wolf, 2000)

La motivación para realizar este proyecto contiene la finalidad de analizar el proceso de doblado de chapa en V, para poder predecir así la recuperación angular y la geometría final de doblado (radio final). Debido a la alta necesidad de desarrollo en el mundo industrial de este tipo de procesos, surgen proyectos de investigación como éste, en los límites que éste aún presenta.

1.2 Objetivos

El objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Grado es hacer un análisis de semejanza entre la teoría y la práctica de la recuperación elástica, que tienen diferentes tipos de materiales (en diferente magnitud) en el proceso de doblado en V. Con todo ello, lo que se pretende es aplicar parte de este trabajo a las prácticas de laboratorio de los alumnos que cursen asignaturas del área de conocimiento de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

Se han de estudiar los comportamientos de varios materiales (aluminio, acero, titanio) en diferentes estados (laminado en dirección longitudinal y transversal, pretensado, recocido) y espesores, con distintas condiciones de experimentación (radios del punzón de doblado).

1.3 Tareas a desarrollar

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se desarrollarán las siguientes tareas:

- *Ver los materiales disponibles en el taller y realizar la caracterización de los mismos.*
Para poder predecir cómo actúan los materiales ante procesos de deformación, será necesario conocer el comportamiento mecánico de los distintos tipos de materiales. Se

estudiarán por tanto las propiedades de todos ellos, haciendo énfasis en las propiedades elásticas y plástica.

- *Realizar un estudio teórico de los procesos de deformación plástica haciendo énfasis en los procesos de doblado, particularmente el doblado en V.*

Este estudio comprenderá de forma muy general los distintos procesos de fabricación más importantes de deformación plástica. Se estudiará el proceso de laminación puesto que éste pudiera llegar a ser un foco de introducción de fallos en el material, lo que daría problemas a la hora de analizar los resultados esperados en la parte experimental del proyecto. Del doblado en V se analizarán todas las características, ventajas, desventajas, usos, equipos, fuerzas, etc., haciendo principal énfasis en las ecuaciones que gobiernan este proceso, focalizando aún más en la recuperación elástica que lleva intrínseco el doblado.

- *Analizar los equipos de doblado que el laboratorio tiene a disposición.*

Se medirán los radios de los punzones como variable experimental del proceso (2,75 mm, 5,5 mm y 12,5 mm) y se realizarán los planos necesarios para mandar a fabricar otro punzón nuevo, de radio menor (1 mm), con el fin de abrir el campo de las variables con las que experimentar.

- *Elaboración de las probetas.*

Se cortarán y se prepararán todas las probetas de los distintos materiales para los distintos punzones. Dependiendo de cada tipo de material (especialmente dependiendo de su dureza), se cortarán las diferentes probetas con los distintos equipos disponibles en el taller. Una vez cortadas, se desbarbarán y se liján. Se han de preparar probetas también para el ensayo de tracción y para el tratamiento de recocido, de algunos materiales.

- *Dar un pretensado a las probetas de algunos materiales que se han fabricado para ser sometidas a la máquina de tracción.*

Con ello, una vez más se introduce una variable experimental adicional, viendo cómo se comportan algunos materiales en el proceso de doblado al introducirles un pretensado previo, dotándoles así de un endurecimiento por deformación anterior al ensayo de doblado, a través de la máquina de ensayo de tracción. Para el ensayo de tracción también se dibujarán en las probetas plantillas de círculos, que permitirán hacer una medida aproximada de la deformación que sufren las probetas en dicho ensayo.

- *Dar un tratamiento térmico de alivio de tensiones a probetas de acero.*

Deduciendo por los resultados que el acero que se experimenta pudiera traer tensiones residuales del proceso de laminación previo al que ha sido sometido, se da entonces un tratamiento térmico de recocido de alivio de tensiones, para más tarde analizar los resultados de ello.

- *Realizar los ensayos de doblado.*
Se realizan todos los ensayos de doblado con todas las variables experimentales.
- *Medir el ángulo de recuperación.*
Con el proyector de perfiles se medirán todos los ángulos de recuperación de todos los ensayos realizados.
- *Medir cualquiera de las variables experimentales susceptibles de ser analizadas como espesores, deformaciones o radios.*
Con ayuda de equipos más especializados, como lo son un microscopio óptico o un medidor de espesores, se medirán magnitudes que pudieran ser analizadas teóricamente más tarde.
- *Realizar los cálculos teóricos del fenómeno de recuperación elástica que experimentan los distintos materiales en ensayo de doblado en V.*
Con el fin de poder ver en la siguiente tarea la credibilidad con la que se podría predecir el ángulo de recuperación de un material, se harán todos los cálculos teóricos necesarios.
- *Hacer un análisis comparativo de la teoría y la práctica, estudiada y experimentada.*
Se estudiarán todos los posibles que hayan podido inducir error en la práctica y las idealidades que la teoría lleva en sí.
- *Intentar acomodar todos los conceptos a una práctica de laboratorio para alumnos.*
Con el último propósito de que se puedan enriquecer un mayor número de alumnos de todo el trabajo contenido en este proyecto, se intentará hacer una exposición de las probetas ensayadas más significativas.

Capítulo 2.

Procesos de deformación plástica

*La ingeniería concurrente
concorre
en lo concurrente.
María Guillén*

2.1 Comportamiento mecánico de los materiales

Para cualquiera de las situaciones en las que partimos de un material que es sometido a algún proceso de fabricación con el fin de obtener una pieza para prestar un servicio, será necesario conocer las características de dicho material y diseñar el componente que se fabrica con él, de manera que ninguna deformación resultante sea excesiva y que no se produzca rotura al ser solicitado.

El comportamiento mecánico de un material se traduce a una relación que existe entre el esfuerzo sometido y la deformación que éste provoca, o simplemente, con otras palabras, se diría que refleja el comportamiento del material ante las cargas que lo solicitan.

A la hora de hacer un diseño mecánico, las principales propiedades a tener en cuenta son la rigidez, resistencia, dureza, ductilidad y tenacidad. Estas propiedades mecánicas de los materiales que se mencionan se determinan realizando experimentos de laboratorio.

A la hora de hacer ensayos lo que se pretende es intentar trasladar, en la manera de lo posible, la realidad que sufrirá el material y analizar su comportamiento. Cuando se habla de realidad se refiere a las condiciones de servicio a las que será sometido éste, teniendo en cuenta factores principales como son la naturaleza y duración de las cargas aplicadas, las condiciones ambientales a las que somete o la temperatura de servicio (Smith, 2004). Pero lo cierto es que dichas propiedades mecánicas resultan de gran interés para una variedad considerable de diferentes sectores de la ingeniería, con diferentes intereses cada uno. Es por ello por lo que se llevan a cabo los ensayos estandarizados e interpretación de sus resultados, pudiéndose destacar aquí las normas actualizadas anualmente que establece la sociedad profesional más solvente de los Estados Unidos, la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Cuando se llega a tal punto, los intereses de estudio de las dos ramas de la ingeniería, estructural y material, se bifurcan. La primera trata de determinar el estado tensional de los componentes sometidos a cargas definidas, mientras que la segunda rama trata de

comprender las relaciones entre la microestructura y las características internas de los materiales. De interés de este proyecto será analizar la primera vertiente de ellas, realizando un análisis del comportamiento tensión-deformación de los metales en relación con sus propiedades mecánicas. Los metales están compuestos por uno o más elementos metálicos como lo son el hierro, aluminio, cobre, titanio, oro y níquel, y en ocasiones también llevan atribuidos elementos no metálicos en proporciones relativamente pequeñas. La distribución que presenta los metales y aleaciones metálicas son átomos muy ordenados y relativamente densos, sobre todo si se compara con otros tipos de materiales como son los cerámicos o los poliméricos. Si se habla de las características mecánicas más concretamente, se puede decir entonces que estos materiales son relativamente rígidos, resistentes y dúctiles, pudiendo desarrollar grandes deformaciones sin llegar a la rotura, propiedades que justifican su uso tan generalizado en la ingeniería estructural (Callister, 2016).

El ensayo más usual para medir la tensión-deformación de un material es el ensayo de tracción. A través de él se es capaz de determinar las propiedades mecánicas de los materiales, y es que es el ensayo por excelencia para ello por su sencillez y fiabilidad de los resultados. A groso modo, el ensayo de tracción consiste en la aplicación gradual creciente y uniaxial de carga hacia una probeta que se deforma hasta alcanzar la rotura.

Las medidas de las probetas para el ensayo de tracción están estandarizadas [UNE-EN ISO 6892-1:2009] y pueden ser de sección circular o de sección rectangular según la Figura 2.1.1.

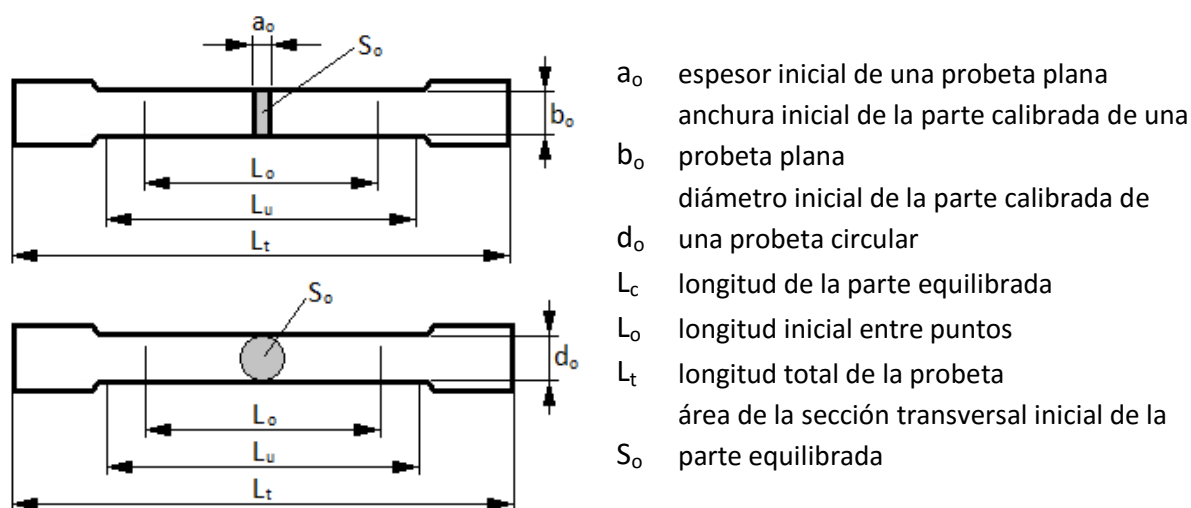


Figura 2.1.1. Dimensiones de probetas de tracción según UNE-EN ISO 6892-1:2009.

Del ensayo de tracción se obtiene el diagrama tensión – deformación (Figura 2.1.2).

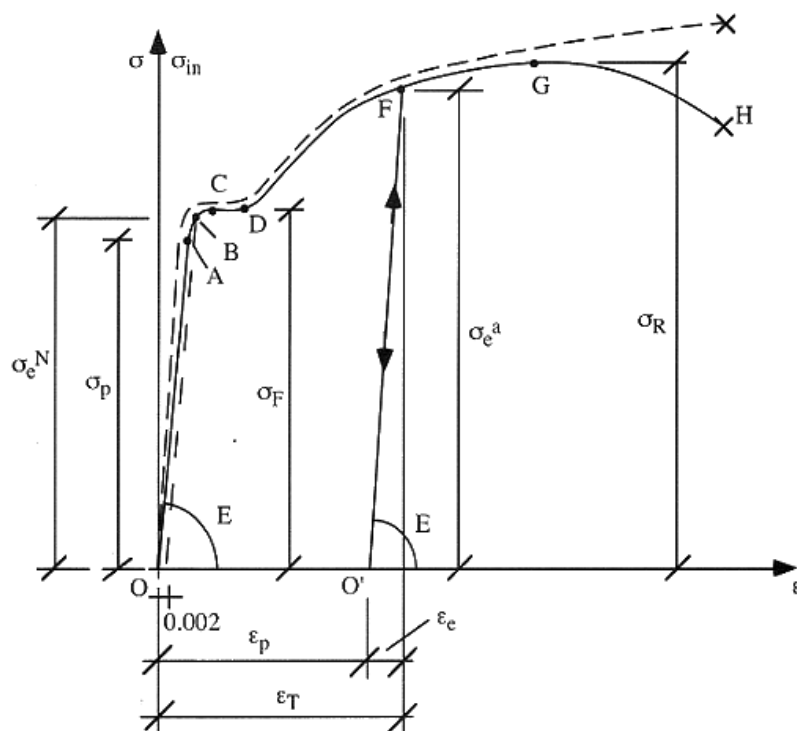


Figura 2.1.2. Diagrama esquemático tensión-deformación en el ensayo de tracción de un acero, donde: σ_p es el límite de proporcionalidad, σ_e^N el límite elástico noval, σ_F la tensión de fluencia, σ_e^a el límite elástico aparente, σ_R la tensión máxima, ϵ_p la deformación plástica, ϵ_e la deformación elástica, ϵ_T la deformación total, E el módulo de la elasticidad y σ_{in} hace referencia a la fuerza dividida entre el área instantánea (que se va reduciendo), dando lugar a la línea de trazo discontinuo.

(Paris, 2000)

En el primer tramo del diagrama (**O-A**) se reproduce un comportamiento elástico lineal del material. Existe una proporcionalidad entre la tensión aplicada y el alargamiento unitario que se produce. Además se observa la reversibilidad total del proceso de carga, pudiendo recuperar el material su forma y tamaño una vez que desaparecen las cargas que lo solicitan, propiedad general de la elasticidad.

Seguido del tramo elástico lineal, aparece un pequeño tramo de comportamiento elástico no-lineal (**A-B**). En éste desaparece la proporcionalidad del tramo anterior, pero sin perderse el carácter elástico. En muchos casos este tramo es obviado debido a su pequeño tamaño y a la complejidad de distinguir su comienzo y fin.

En el tramo (**B-D**) se puede observar el escalón de fluencia del material. En él, el material no requiere de más tensión para que aumente la deformación, siendo un poco confuso, pues su nitidez depende mucho del tipo de material que se solicita, llegando incluso a no aparecer en todos ellos.

El tramo **(D-G)** es el que comúnmente hace referencia al comportamiento de endurecimiento por deformación del material, requiriéndose que se aumente la tensión para que se produzca incremento en la deformación, siendo un tramo no lineal donde la pendiente de la curva va disminuyendo a medida que avanzamos en las tensiones y deformaciones del material. En él además del comportamiento elástico aparece el plástico o permanente, lo que se conoce como comportamiento elasto-plástico. Cuando las cargas que solicitan al material desaparecen, éste se descarga por una línea paralela al tramo elástico lineal, el material recupera la deformación elástica, quedando solo la plástica o permanente. Y he aquí la causa principal por la que se estudia este proyecto, intentando predecir la deformación final al restarle la parte elástica que el material recuperara una vez que deja de ser solicitado.

Por último se tiene la zona de estricción, tramo **(G-H)**, donde cada vez hace falta aplicar menos fuerza para separar las mordazas, produciendo una disminución localizada de la sección transversal de la probeta hasta alcanzar la rotura del material.

De la zona elástico lineal se extrae la información del módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young del material como la pendiente de la recta de este tramo, $E = \sigma / \epsilon$, además del módulo de Poisson, ν , como el cociente entre la contracción transversal unitaria y el alargamiento longitudinal unitario. Del siguiente tramo se obtiene la tensión o esfuerzo de fluencia, que debido a la difusividad del tramo en los distintos materiales, se optará por tomar el límite elástico aproximadamente igual a la tensión de fluencia e igual al valor de la tensión que deja una deformación en la probeta del 0,2 %. Del resto de tramos también se obtienen como datos la tensión máxima (o resistencia a la tracción) y la tensión de rotura (Paris, 2000).

El valor del módulo elástico E da una medida de la rigidez del material, a mayor E más rígido será el material. Además de la rigidez, también se pueden medir otros conceptos del material como:

- La ductilidad, una propiedad mecánica importante que mide el grado de deformación plástica que se ha soportado hasta la rotura. Cuantitativamente, la ductilidad se mide en términos de porcentaje de alargamiento y de reducción de área.
- La resiliencia, que se mide como la capacidad que tiene un material de absorber energía cuando se deforma elásticamente y luego, tras la retirada de carga, absorbe y almacena esta energía.
- La tenacidad, energía absorbida durante la rotura del material, determinada bajo el área de la curva ingenieril de tensión-deformación.
- La dureza, una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada. Las dos técnicas de ensayo de dureza más comunes son el ensayo Rockwell y el Brinell, el primero basándose en la diferencia de profundidad de indentación al aplicar la carga mínima y máxima; el segundo ensayo utiliza el tamaño de indentación.

Todo ello sin olvidar nunca los factores que pueden conducir a la dispersión en las medidas de las propiedades de un material: el método de ensayo, las variaciones en el proceso de fabricación de la muestra, el error humano, la calibración de los aparatos y la falta de homogeneidad o variaciones en la composición de la muestra. Como forma más simple y general se considera tomar el valor medio y la desviación estándar (Callister, 2016).

Existen también otros tipos de ensayos similares al de tracción, como es el de compresión. Se obtienen datos similares y comprende más complicación a la hora de su ejecución, por lo que es poco usual ya que aporta poca información extra. Sólo se utiliza este tipo de ensayo para reproducir aplicaciones de la fabricación o cuando el material es frágil a tracción.

Aunque el acero y muchos materiales metálicos tengan un comportamiento similar al representado en la Figura 2.1.2, existen diferentes tipos de comportamientos idealizados que se muestra en la Figura 2.1.3.

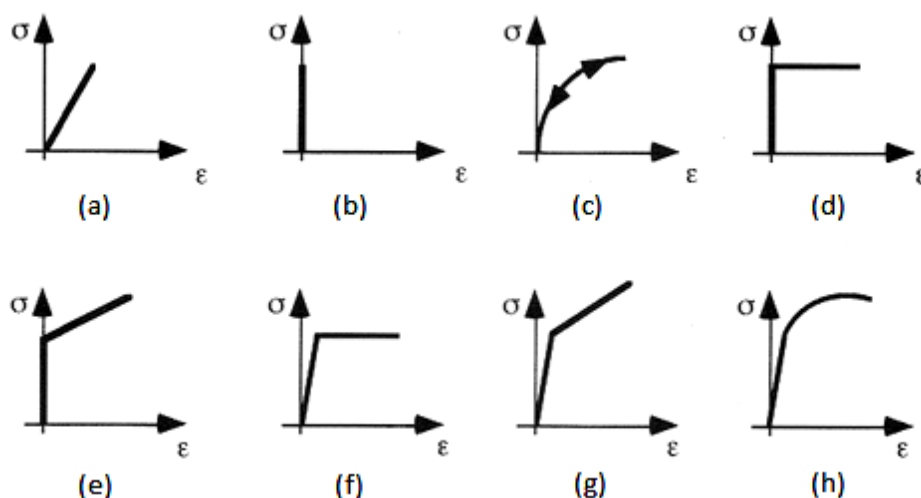


Figura 2.1.3. Diferentes comportamientos idealizados de sólidos deformables: a) elástico lineal, b) rígido, c) elástico no lineal, d) rígido plástico ideal, e) rígido plástico lineal, f) elastoplástico ideal, g) elastoplástico lineal, h) elastoplástico no lineal.

(Paris, 2000)

2.2 Deformación plástica como proceso de fabricación

Los procesos de conformado por deformación plástica son aplicados a preformas de las que se parten (ya sea un lingote o una chapa) y que se someten a unas matrices, con el fin de obtener una determinada geometría final.

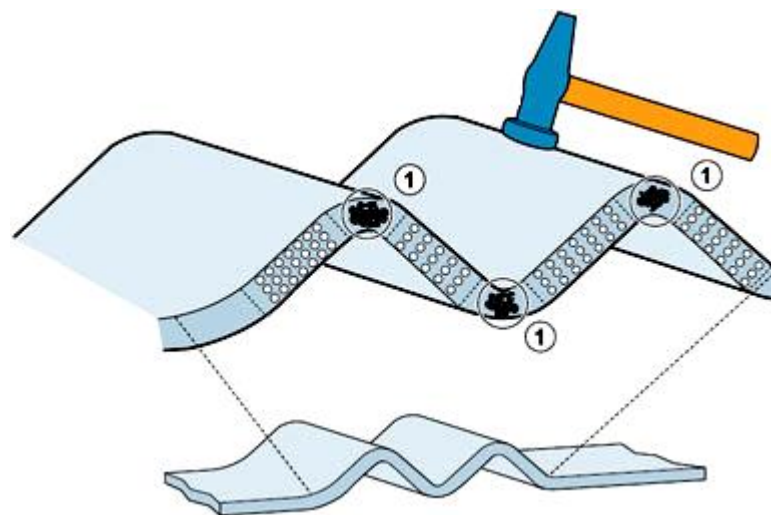


Figura 2.2.1. Representación del endurecimiento por deformación.
(ELCHAPISTA.COM, s/f)

El endurecimiento por deformación es un fenómeno por el cual un metal dúctil se hace más duro y resistente a medida que se deforma plásticamente. Microscópicamente esto sucede debido a que la densidad de las dislocaciones aumenta, disminuye la distancia media entre dislocaciones adyacentes y queda más restringida la movilidad de éstas, de modo que el metal se vuelve más duro y resistente (Figura 2.2.1). Para definir la relación tensión-deformación durante la deformación plástica de un metal en frío, comúnmente se utiliza la *ley de Hollomon*, ecuación 2.2.1, donde K es el coeficiente de resistencia (esfuerzo para una deformación natural igual a uno) y n es el exponente de endurecimiento por deformación (medida de la capacidad de un metal para endurecer), que relacionan el esfuerzo real y la deformación real.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.2.1)$$

El grado de deformación plástica puede expresarse como el porcentaje de trabajo en frío (medida de ductilidad), también llamado porcentaje de reducción de área r , que depende de las áreas de la sección original (A_0) y de la deformada (A_d), tal y como se indica en la ecuación 2.2.2. Otra medida de la ductilidad es la elongación e , ecuación (2.2.3), donde la deformación plástica se mide en función de las longitudes iniciales (l_0) y finales (l_f) del material.

$$\% \text{ de trabajo en frío} = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_d} \right) \times 100 \quad (2.2.2)$$

$$e = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (2.2.3)$$

El endurecimiento por deformación a menudo se utiliza en la práctica para aumentar las propiedades mecánicas de los metales en los procesos de conformado. El límite elástico, la resistencia a tracción y la dureza de un metal aumentan con dicho porcentaje, mientras que la ductilidad disminuye. Este efecto se elimina mediante tratamiento térmico. La mayoría de los metales endurecen por deformación a temperatura ambiente.

Los materiales metálicos son aptos para una amplia gama de conformado en metal, tanto en frío como en caliente. El metal se procesa fundiéndose en un horno que actúa como depósito (en el que se añaden los elementos necesarios para obtener la aleación que se desea) y colándose posteriormente en un molde, donde se produce el enfriamiento directo. Es así como se obtienen los enormes lingotes con las diferentes formas, ya sea en forma de planchas o de barras con distintas secciones, según interese, para el proceso al que será sometido el material. Otra opción será introducir el material fundido directamente a un molde que comprende directamente la forma que deseamos obtener, lo que comúnmente se denomina como proceso de fundición. Los lingotes o planchas, en oposición, serán sometidos a otros procesos tales como la extrusión o la laminación, de los que se podrán obtener preformas que serán sometidas a un segundo proceso de deformación plástica (Smith, 2004).

En una primera división, los procesos de conformado se podrían clasificar en dos grandes grupos que se explican en los epígrafes 2.3 y 2.4: procesos de deformación en masa y procesos de deformación de chapa (Estévez Urra, y otros, 2015).

Realmente, el mundo de los procesos de fabricación cada vez se hace más infinito, la tecnología avanza a pasos agigantados en cualquiera de sus ramas y éstas se van entrelazando hasta conseguir combinaciones excelentes, dando lugar a procesos de nuevas generaciones que avanzan en aspectos como la calidad y el tiempo. Es por ello por lo que se abreviará en los epígrafes 2.3 y 2.4, haciendo mención a los principales procesos de fabricación, sin menospreciar a todos los demás que no serán explicados y que se encuentran en continuo desarrollo.

2.3 Procesos de deformación en masa

Pertenecen a este primer grupo los procesos en los que el material de partida es un lingote, una barra o un bloque; y son procesos tales como la extrusión, el forjado, el laminado o el trefilado. Conformando bajo presiones grandes de compresión, obtenemos como resultado un aumento considerable de la relación superficie/volumen. Deformaciones en toda la pieza o en gran parte de ella, que generalmente se realizan en caliente.

2.3.1 Forja y estampación

En general, la forja y la estampación son procesos de conformado mediante la compresión del material entre dos matrices, normalmente una móvil otra fija. Dentro de los distintos tipos de esta clase de procesos distinguimos la forja libre (Figura 2.3.1.a), un proceso que se realiza con matrices abiertas para la fabricación de piezas simples, ya que es un proceso básicamente artesanal, requiriendo por tanto de gran destreza en el operario que la realiza. Por otro lado, se distingue la estampación con rebaba (Figura 2.3.1.b) de la estampación sin rebaba o con estampa cerrada (Figura 2.3.1.c), la cual requiere de mayor precisión. De la estampación sin rebaba se obtienen piezas acabadas menos complejas que la estampación con rebaba y con una excelente precisión dimensional.

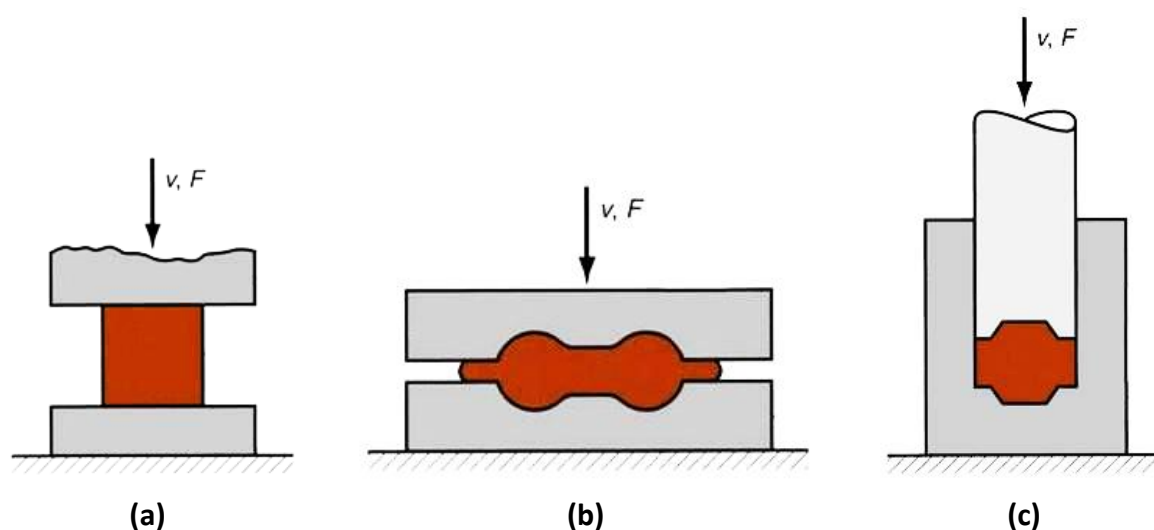


Figura 2.3.1. Tipos de forjado: (a) forjado libre, (b) estampación con rebaba, (c) estampación sin rebaba. (Kalpakjian, 1991)

2.3.2 Laminación

La laminación es un proceso comúnmente usado para metales y aleaciones, ya sea en frío o en caliente. A través de este proceso se producen chapas y placas metálicas de gran longitud y con sección transversal constante, Figura 2.3.2. La laminación conforma el material mediante la compresión de éste entre dos rodillos giratorios y es un proceso estacionario, donde la fricción entre el rodillo y el material hace que éste último se introduzca de forma continua entre los rodillos. Este proceso comprende dos grandes clasificaciones, una según la finalidad del producto que se desea obtener y otra según la temperatura de trabajo. De la primera clasificación se separa la laminación plana, cuando el objetivo es reducir el espesor de la preforma; de la laminación de forma, cuando además del objetivo anterior también se opta por un conformado concreto de la sección. De la segunda clasificación se distingue la laminación en caliente, cuando lo que se desea son grandes reducciones o formas

complejas; de la laminación en frío, que es utilizada para obtener dimensiones más precisas y endurecimiento del producto.

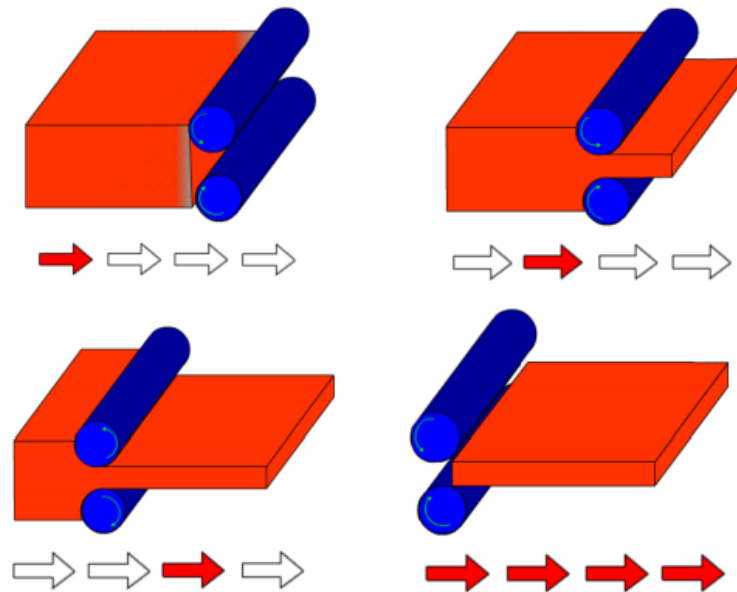


Figura 2.3.2. Pasos de la laminación.
(Barbarin Matute, 2014)

Concretamente, para la fase experimental de este proyecto, el material de partida para obtener las preformas serán enormes planchas de distintos materiales, que provienen del proceso de laminación de una empresa externa. Se obtendrán dos tipos de probetas, unas que se cortarán en dirección longitudinal o dirección de la laminación, y otras de sección transversal o en contra de la laminación, analizando posteriormente si existe alguna repercusión en los resultados del proceso de doblado que se analizarán.

También se verá que debido a la no homogeneidad de las deformaciones, por el proceso de laminación al que se someten las chapas, estarán presentes en el material tensiones residuales que darán lugar a defectos por la anisotropía creada. Como opción de medida a adoptar para solventar dicho problema, se decide someter al material a un tratamiento térmico de recocido para alivio de tensiones. Este tratamiento, a groso modo, consiste en llevar el material hasta una temperatura elevada, por debajo de la mitad de la temperatura de fusión del metal, seguido de un enfriamiento lento. No produce cambios en la microestructura del metal, pero libera tensiones internas en la estructura previamente distorsionada.

2.3.3 Extrusión

Proceso que consiste en aplicar un esfuerzo de compresión sobre una preforma, haciéndola incidir en el orificio de una matriz de extrusión, quedando grabada la geometría de la matriz

sobre la preforma, a la vez que el material va pasando a lo largo de ella de forma continua. Se habla entonces de un proceso estacionario mediante el que se obtiene, una vez más, piezas de sección transversal constante. A pesar de ser un proceso característico por la necesidad de grandes fuerzas de prensado, con él se obtienen grandes reducciones y gran variedad de formas, especialmente si la extrusión se realiza en caliente, pudiéndose destacar la mejora de la resistencia mecánica y la posibilidad de obtener resultados con tolerancias muy estrechas. En la clasificación del proceso de extrusión, aparte de en frío y en caliente, diferenciamos: la extrusión directa (Figura 2.3.3), donde el movimiento del pistón y la salida del material son en la misma dirección; la extrusión indirecta (Figura 2.3.4), donde por el contrario, el movimiento del pistón y el de salida del material son opuestos; la extrusión hidrostática (Figura 2.3.5), variante de las dos anteriores, que consiste en la introducción de un fluido entre el material y el contenedor; y la extrusión por impacto (Figura 2.3.6), donde la compresión se realiza de manera instantánea, directa o indirectamente.

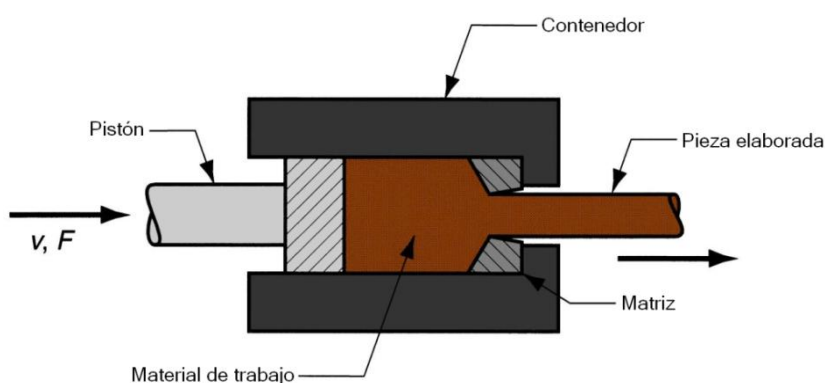


Figura 2.3.3. Esquema de extrusión directa. (Kalpakjian, 1991)

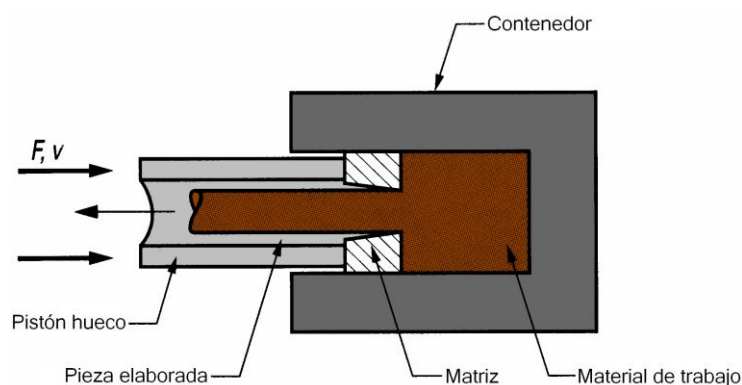


Figura 2.3.4. Extrusión indirecta. (Kalpakjian, 1991)

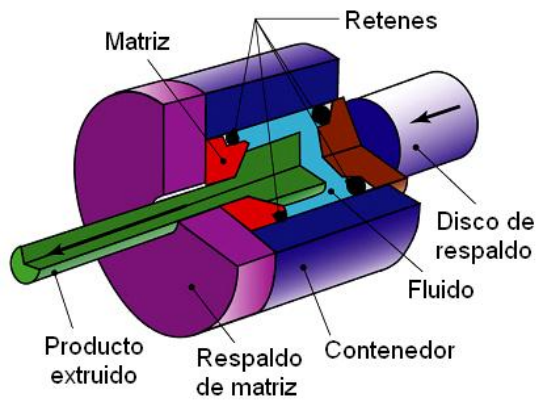


Figura 2.3.5. Extrusión hidrostática.
(Kalpakjian, 1991)

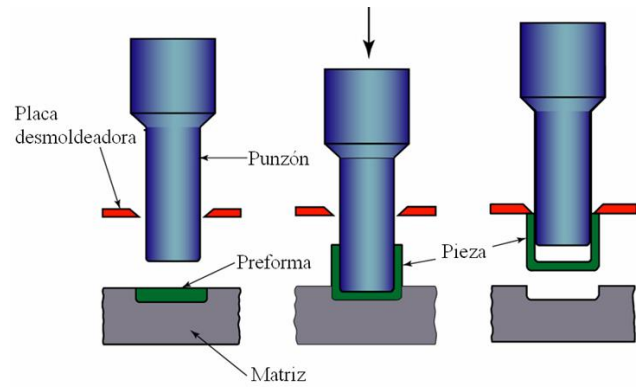


Figura 2.3.6. Extrusión por impacto.
(Kalpakjian, 1991)

2.3.4 Estirado

El estirado es un proceso que guarda cierto parecido con la extrusión, aplicando esta vez una fuerza de tracción a la salida del material, y no de compresión. El material plastifica bajo las tensiones de compresión generadas en la hilera y es un proceso que se realiza generalmente en frío, ya que su misión básica es endurecer y calibrar (Figura 2.3.7).

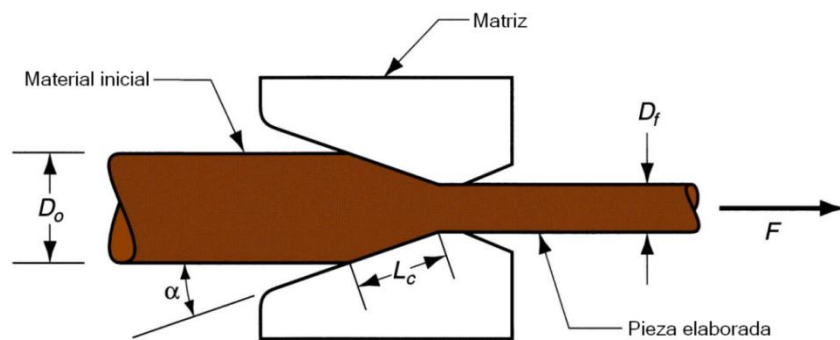


Figura 2.3.7. Proceso de estirado. (Kalpakjian, 1991)

2.4 Procesos de deformación de chapa

Acabado con los procesos de conformado volumétrico, se pasa entonces a hablar de los procesos de conformado de chapa, donde las deformaciones en este caso serán en zonas localizadas de la pieza. Pertenecen a este segundo grupo las deformaciones plásticas sobre una chapa metálica aplicando esfuerzos de tracción o flexión, a menudo sin cambios significantes en el grosor de la chapa o en la superficie de la pieza. Deformaciones en zonas localizadas de la pieza, que generalmente se realizan en frío. Son procesos tales como el doblado, el punzonado o la embutición.

Como ya se hablaba en el Capítulo 1 de este proyecto, este tipo de procesos tan importante en el desarrollo industrial se caracterizan, entre otros factores, por: la alta productividad, calidad y precisiones estables, alto coeficiente de utilización del material, buena resistencia mecánica, alta relación resistencia/peso y la posibilidad de fácil mecanización y automatización.

Son procesos que generalmente se realizan en frío y entre los básicos se encuentran los que se citan a continuación.

2.4.1 Corte de chapa

Este proceso en general consiste en la separación total o parcial de una parte del material del otro. En él una hoja metálica o chapa se corta al someterla a esfuerzos cortantes localizados, mediante la acción conjunta de dos cuchillas o matrices, una fija (matriz) y otra móvil (punzón).

El proceso del corte de una chapa se divide en dos etapas, las cuales se muestran en la Figura 2.4.1 que se adjunta.

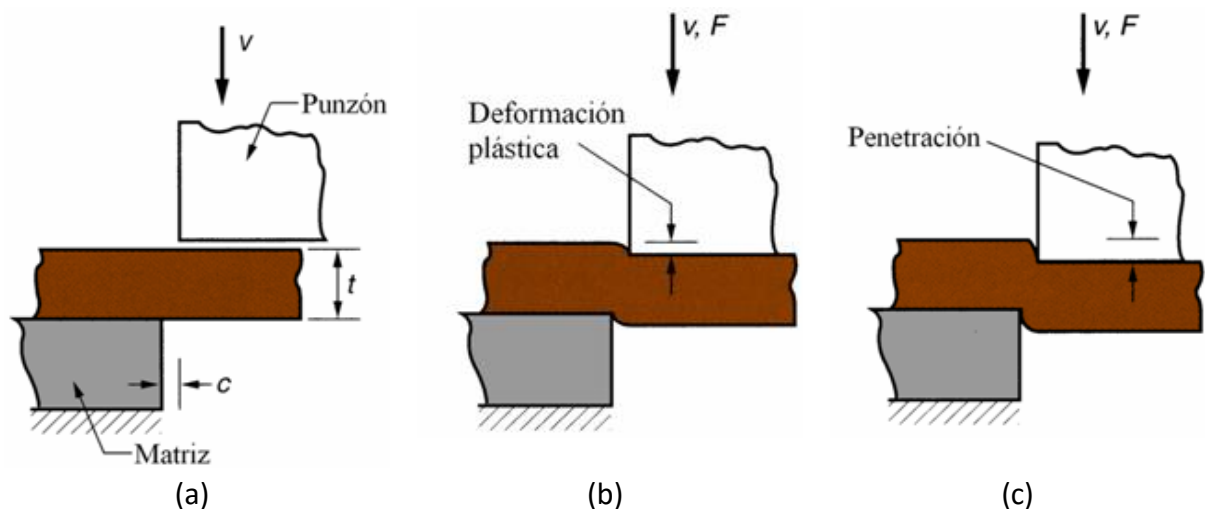


Figura 2.4.1. Etapas proceso de doblado de una chapa metálica. (Kalpakjian, 1991)

En la Figura 2.4.1.a puede verse el punzón antes de entrar en contacto con el material (obsérvese la holgura c). En la Figura 2.4.1.b se puede observar como el punzón empieza a oprimir la chapa, causando así deformación plástica. En la Figura 2.4.1.c el punzón penetra en la chapa formando una superficie lisa y bruñida de corte

2.4.2 Embutición

Es una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas de forma acoplada, de caja y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia la cavidad de éste con un punzón tal y como se muestra en la Figura 2.4.2.

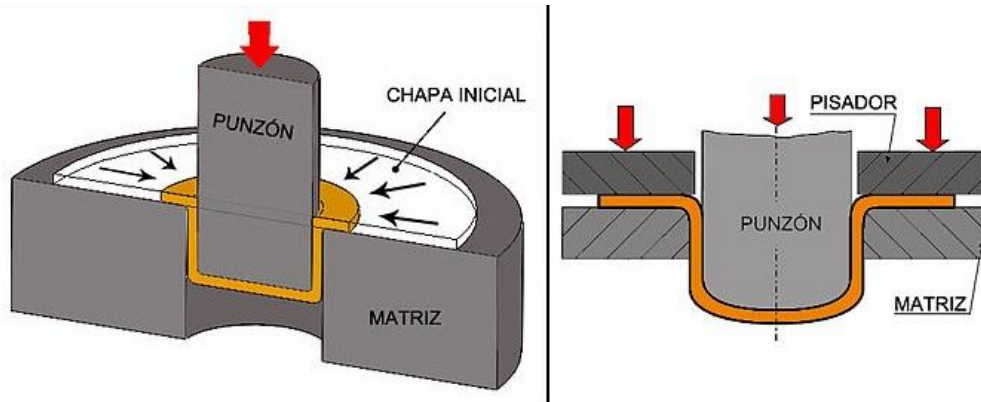


Figura 2.4.2. Esquema proceso de embutición.
(Barbarin Matute, 2014)

2.4.3 Estampación y estirado

Particularizando estos dos tipos de procesos (ya explicados) para el conformado de chapa, se puede decir que el primero de ellos, la estampación, se utiliza para crear indentaciones a través de la compresión ejercida en el metal, mediante dos moldes. Para el estirado de chapas, los extremos de la chapa se sujetan mediante unas mordazas y sobre esta configuración actúa la matriz con la forma de la pieza deseada (Figura 2.4.3). El material se deforma plásticamente pero ahora con toda la sección traccionada, lo que provoca unas deformaciones más uniformes y una recuperación elástica menor. Es por ello por lo que ya se verá más adelante, que este proceso será una de las alternativas a la hora de reducir el fenómeno del *springback*.

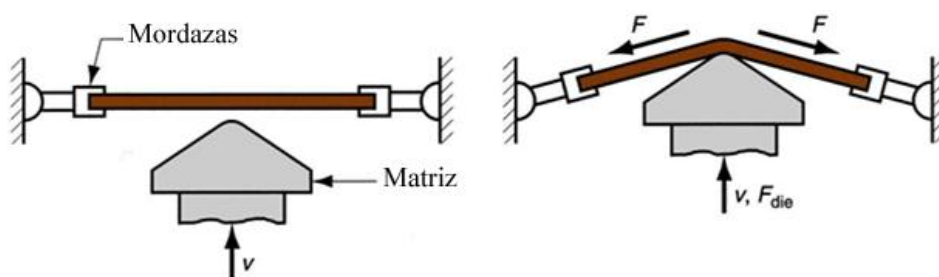


Figura 2.4.3. Estirado de chapa. (Kalpakjian, 1991)

2.4.4 Hidroconformado

Dejando atrás un poco los procesos más tradicionales, se puede hablar entonces de este tipo de proceso que permite la expansión controlada de chapas y tubos metálicos, mediante la presión de líquidos. Focalizando en la explicación del hidroconformado de láminas, se especifica que el proceso requiere de la utilización de una prensa y una lámina de metal, de la misma manera que se utiliza en el formado tradicional de chapa, la cual es sometida a una presión de 100 a 350 toneladas para calcar la forma determinada del molde. El fluido que presiona la chapa sobre el molde, se encuentra en la cavidad de una de las matrices, las cuales mediante una fuerza mecánica, presionan el metal para su conformado final. La fricción que se presenta comúnmente al momento de la presión ejercida por el punzón sobre la chapa en cualquier proceso de conformado tradicional, genera tensión y desgaste en el metal. Esta fricción desaparece con el hidroconformado de lámina, puesto que permite remplazar el punzón metálico, por un fluido que moldea el metal y genera formas más finas y menos desgaste entre las piezas (Figura 2.4.4). (Barbarin Matute, 2014)

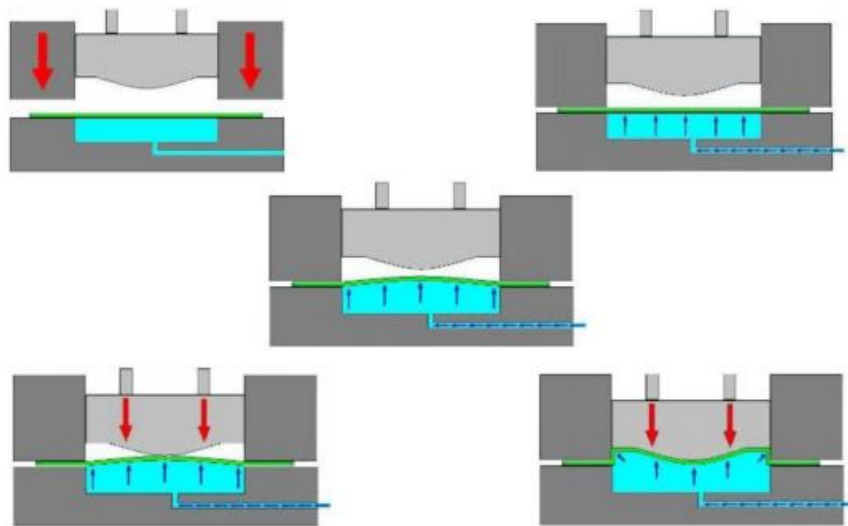


Figura 2.4.4. Pasos del hidroconformado de chapa.
(Barbarin Matute, 2014)

Como ya se decía, también existen otros tipos de procesos de conformado en chapa como el abombamiento, el conformado rotativo, el conformado con elementos flexibles, etc.

Pero realmente, el principal proceso de conformado de chapa que se analiza en este trabajo es el doblado o plegado, proceso que se analizará con más lujo de detalle en los apartados siguientes.

2.5 Procesos de doblado

El proceso de doblado es el proceso por excelencia para el conformado del metal y no sólo es utilizado para lo que comúnmente la intuición lleva a pensar (rebordes, bucles, ondulaciones), sino que también se utiliza para proporcionar rigidez a las piezas, aumentando su momento de inercia. Es un proceso sencillo, que generalmente se lleva a cabo en una prensa, donde los punzones y matrices que las componen son de geometría relativamente simples, pero que con un estudio y diseño inteligente de múltiples operaciones, se pueden llegar a obtener formas muy complejas.

La división de procesos de doblado recto más importantes comprende:

- El doblado a fondo, también conocido como doblado convencional o en V, del que se hablará con más detenimiento en el epígrafe 2.6.
- El doblado al aire, también conocido como plegado en tres puntos o doblado libre, Figura 2.5.1.a, donde la chapa se soporta entre dos apoyos y un punzón la deforma ejerciendo presión en la mitad de ella.
- El doblado con dado deslizante (plegado en voladizo), o en su variedad, basculante. Comúnmente utilizado para producir rebordes de tipo panel más largos, Figura 2.5.1.b.

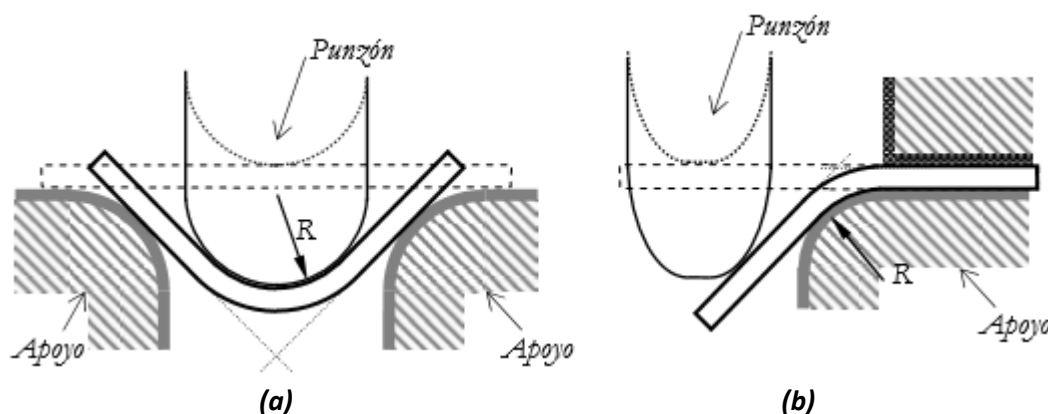


Figura 2.5.1. Esquema del proceso del doblado al aire por tres puntos (a) y del doblado con dado deslizante (b).

(García-Romeu de Luna, 2005)

Como proceso más actual cabe citar también la tecnología laser para el doblado de chapas metálicas (Vasile, Vasile, Thamodhara, & Wolf, 2000).

En general, con la operación de doblado de una chapa, lo que se pretende conseguir es fabricar una superficie cilíndrica conectada a dos superficies planas, tal y como se muestra en la Figura 2.5.2 de forma idealizada, donde: t es el espesor de la chapa, w el ancho de la chapa, L la longitud del arco doblado de la chapa, R el radio interior de doblado y θ el ángulo de doblado.

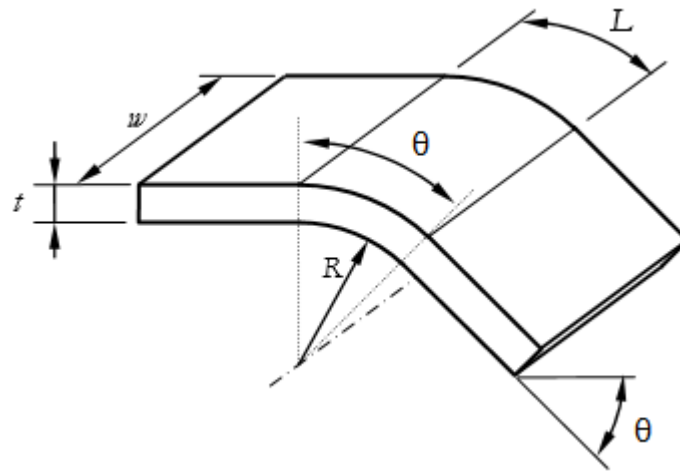


Figura 2.5.2. Representación ideal de una chapa doblada.
(García-Romeu de Luna, 2005)

Pero desafortunadamente lo ideal suele diferir de lo real, y es por ello por lo que pueden aparecer defectos como: curvaturas no constantes, Figura 2.5.3.a; pérdida de tangencia en las líneas de doblado, Figura 2.5.3.b; distinto ángulo de doblado en la cara interior y exterior, Figura 2.5.3.c.

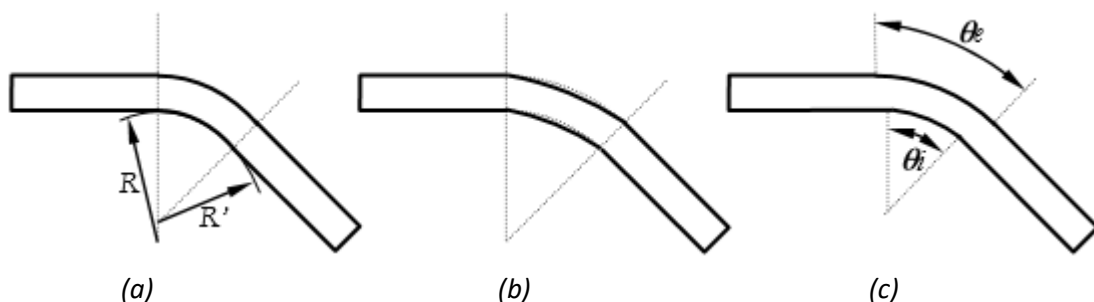


Figura 2.5.3. Representación de doblados no lineales.
(García-Romeu de Luna, 2005)

Durante el proceso de doblado la chapa se somete a un momento flector M hasta alcanzar deformaciones plásticas en el metal como se puede observar en la Figura 2.5.4.

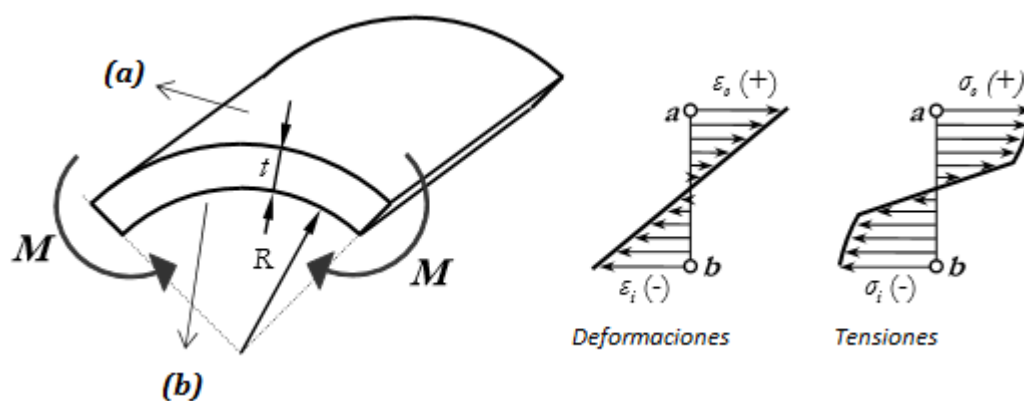


Figura 2.5.4. Esquema de una chapa sometida a un momento flector M , con las deformaciones y tensiones que éste provoca idealmente a lo largo del espesor t de la chapa.

(García-Romeu de Luna, 2005)

Las caras más exteriores (a) del material están sometidas a tracción (las fibras se alargan), mientras que las caras más interiores (b) están sometidas a compresión (las fibras se acortan). La situación que se muestra en la Figura 2.5.4 es ideal ya que se ha supuesto que la fibra neutra, la cual separa las fibras que se alargan de las que se acortan (por lo que su incremento de deformación es nulo), se mantiene siempre en el plano medio del espesor de chapa.

La deformación de cualquier punto de la chapa se define como el producto de la curvatura por la distancia del punto a la línea neutra. Teniendo en cuenta que la curvatura que produce el doblado es igual al inverso del radio de la línea neutra, se puede considerar, tal y como se muestra en la distribución de deformaciones (Figura 2.5.4), que las deformaciones de la cara exterior (a) es igual en magnitud a las de la cara interior (b). A continuación se muestra el valor de la curvatura k y la deformación de las cara más exteriores ε como producto de la curvatura por la distancia a las caras de la línea neutra, $t/2$.

$$k = \frac{1}{R + \frac{t}{2}} \quad \xrightarrow{\varepsilon = k \cdot t/2} \quad \varepsilon = \frac{1}{\frac{2R}{t} + 1} \quad (2.5.1)$$

Lo cierto es que en la realidad la fibra neutra suele tender a desplazarse hacia la superficie interior de la chapa, debido a la curvatura. Es por ello por el que el material plastifica más por las caras exteriores, aumentando así su magnitud en la deformación.

2.5.1 Doblado al aire

A diferencia del proceso de doblado en V, la chapa no se prensa completamente contra la matriz. La gran ventaja de este procesos es que con una misma combinación punzón-matriz se admiten diversidad de materiales y grosores, pudiéndose producir varios ángulos

ajustando el desplazamiento entre ambas herramientas. Por todo ello, se caracteriza por ser un proceso muy flexible y eficiente, además de requerir de una maquinaria de menos potencia, al ser la fuerza necesaria menor que en el proceso convencional o doblando en V. La industria cada vez va reconociendo más esta serie de ventajas, aunque no todo lo son. El principal inconveniente de este proceso radica en la dificultad de describirlo y controlarlo, pues la geometría final de la pieza y el cálculo del desarrollo plano de la pieza de partida no se hacen nada fáciles en este tipo de procesos. Además, el mercado exige en la fabricación de piezas dos ítems muy importantes como lo son la alta calidad y repetitividad, ambos requerimientos difíciles de obtener en los procesos de doblado al aire. En lo que respecta al último de ellos, las mismas propiedades del material o las desviaciones en el grosor de la chapa, entre otros, son factores de gran influencia a la hora de controlar la repetitividad de los procesos. Con respecto a la alta calidad de los productos que se fabrican, esto se traduce a una demanda de productos precisos, a la exigencia de ángulos de doblado dentro de un rango muy estrecho de tolerancia. Y es aquí donde aparece el fenómeno en el que se centra este proyecto, un fenómeno que aparece en ambos procesos de doblado de chapa y el que se abarcará con más profundidad más adelante de este escrito, la recuperación elástica o *springback*. En este fenómeno entran en juego el comportamiento elástico de los materiales, anteriormente descrito, junto a variaciones del grosor de la chapa y las propiedades de material, provocando una desviación angular y desviaciones por tanto, que hacen que las piezas procesadas no entren dentro del rango de tolerancia exigido y por tanto no sean aptas en el control de calidad. (García-Romeu de Luna, 2005)

2.6 Proceso de doblado en V

El proceso de doblado en V, lo que comúnmente también se conoce como doblado convencional o doblado a fondo, es un proceso que abarca dos etapas (Figura 2.6.1): la primera de ellas es la de doblado al aire en tres puntos tal y como se ha explicado en el epígrafe 2.5; la segunda, una acuñación con el propósito de tocar el fondo de una matriz con forma de V. También existen otros tipos de doblado a fondo, por ejemplo el doblado en U, aunque este trabajo se centrará en el de la matriz V.

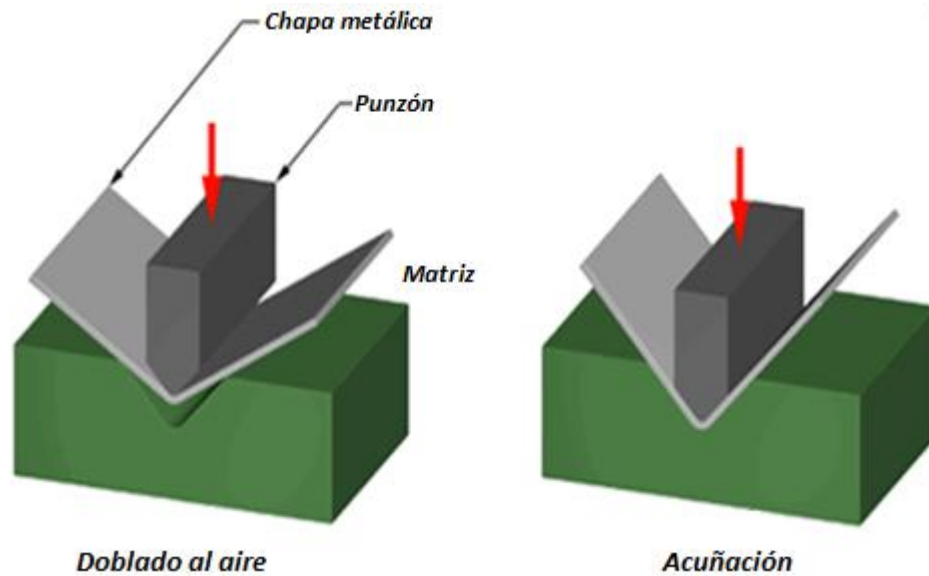


Figura 2.6.1. Representación de las dos etapas del doblado a fondo.
(Bibliografía de Cátedra, 2014)

Con la acuñación, lo que se pretende es definir la curvatura de la chapa, forzándola a conformar la forma punzón-matriz. Es por ello, que el fondo de la matriz tiene que tener un radio igual a la suma del radio del punzón más el espesor de la chapa, en matrices cerradas, o un radio menor para matrices semicerradas. En este proyecto se estudiará el último caso por proporcionar más versatilidad, con una matriz puntiaguda en forma de V, como se ilustra en la Figura 2.6.2.

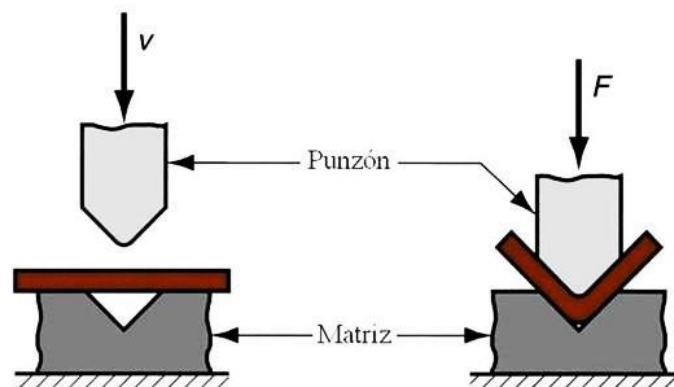


Figura 2.6.2. Esquema proceso de doblado en V. (Kalpakjian, 1991)

A diferencia que en el doblado al aire, en el doblado en V las características del doblado ángulo y radio están marcadas por la combinación punzón y matriz, lo que provoca que este tipo de doblado sólo sea económicamente adecuado para lotes de gran tamaño.

Aunque a priori este proceso parece simple, hasta que no es estudiando a fondo, realmente no se es capaz de ver la complejidad y la cantidad de parámetros a estudiar que este proceso

abarca. En efecto, este proceso se centrará en la recuperación elástica, pero no se pueden dejar atrás parámetros tan importantes como lo son el radio mínimo de doblado, la fuerza de doblado o la longitud de la chapa desplegada, entre otros.

2.6.1 Radio mínimo de doblado

Como su propio nombre indica, con este parámetro se denomina el radio a partir del cual una pieza puede doblarse de forma segura. Es el radio a partir del cual una grieta aparece en la superficie más exterior del doblado, se determina de manera experimental y se encuentra como característica de la chapa en forma de tablas (Tabla 2.6.1), expresado en función del espesor.

Tabla 2.6.1. Radio mínimo de doblado para diferentes materiales en función del espesor de la chapa a temperatura ambiente (Kalpakjian, 1991).

MATERIALES	Blando	Duro
Aleaciones de aluminio	0	6t
Cobre al berilio	0	4t
Latón, bajo plomo	0	2t
Magnesio	5t	13t
Aceros inoxidables austeníticos	0,5t	6t
Aceros bajo-carbono, baja aleación y alta resistencia baja aleación (HSLA)	0,5t	4t
Titanio	0,7t	3t
Aleaciones de titanio	2,6t	4t

2.6.2 Fuerza de doblado

Es la carga que se ejerce sobre la chapa a través del punzón. Esta fuerza va en función del tiempo o del desplazamiento y se puede estimar asumiendo el proceso de doblado como una flexión pura de una viga rectangular de ancho y espesor constantes. La fuerza de doblado depende en gran medida de la resistencia del material, de las condiciones geométricas de la chapa (longitud de doblado y espesor) y de la obertura de la matriz. Con todo ello se puede estimar la fuerza máxima de doblado como:

$$F = k \frac{lt^2 S_{ut}}{w_d} \quad (2.6.1)$$

Donde:

l	es la longitud de doblado	S_{ut}	es el esfuerzo de tracción último
t	es el espesor de la chapa	k	es un factor geométrico de la matriz, que toma
w_d	es la obertura de la matriz		valores entre 1,2 y 1,33 para la matriz en forma de V

La ecuación 2.6.1 se ajusta bien a las situaciones en las que el radio del punzón y el espesor de la chapa son pequeños, en comparación a la abertura de la matriz. También hay que puntualizar que en la fórmula se excluye la fricción.

Como ya se decía, la fuerza durante el proceso de doblado se puede describir en función del desplazamiento del punzón, y es que es justo esto lo que nos muestra la gráfica de Figura 2.6.3. Según (De Vin, 1994) el desplazamiento aumenta desde cero hasta un valor máximo y debe decrecer cuando el doblado se ha completado. Mientras que en el doblado al aire la fuerza no aumenta otra vez después de que empieza a decrecer, algo muy diferente ocurre en el doblado a fondo, donde la fuerza aumenta acusadamente mientras el punzón llega al fondo de la matriz (la fuerza progresa, sujeta a las restricciones impuestas por la matriz). Este crecimiento durante la acuñación aumenta en una proporción más pronunciada y se vuelve infinita.

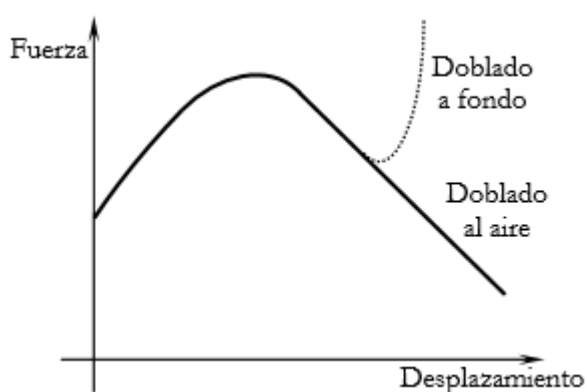


Figura 2.6.3. Ejemplo de un diagrama Fuerza de doblado-desplazamiento del punzón.
(De Vin, 1994)

2.6.3 Longitud de la chapa desplegada

Con este parámetro queda definida la longitud de la chapa de la que se ha de partir para realizar un proceso de doblado, con el fin de que se cumplan las especificaciones geométricas de la pieza final deformada. Para ello, lo primero que se ha de definir es la fibra neutra: es la línea para una curvatura determinada, por encima de la cual todas las fibras se van a alargar y por debajo todas se van a acortar, lo que hace que el incremento de deformación principal en dicha línea sea nulo. A menudo esta se confunde con la fibra indeformada, la cual en un instante determinado tiene una longitud igual a la longitud inicial.

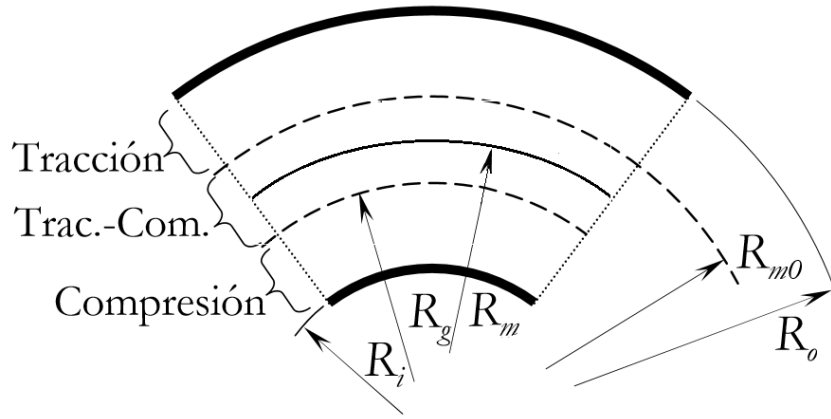


Figura 2.6.4. Radios característicos de la chapa deformada.

En la Figura 2.6.4 se pueden ver todos los radios que caracterizan las fibras importantes de la chapa deformada: R_i y R_o hacen referencia a los radios interior y exterior respectivamente, R_{m0} y R_m caracterizan las líneas medias de la sección indeformada y de la deformada y finalmente R_g será lo que se pase a llamar ρ , que es el radio de curvatura de la línea neutra. En cambio en la figura no se muestra la línea indeformada, ya que siempre en este proyecto se considerará el doblado como una flexión pura que no provoca reducción en el espesor, lo que hace que la fibra indeformada coincida con la línea media de la deformada. El material sufre tracción en el doblado entre el radio exterior (R_o) y la capa inicial media (R_{m0}), por el contrario, entre el radio interior (R_i) y la fibra neutra (R_g) sufrirá compresión. Entre los dos tramos existe un tercero, en el que primero el material se comprime para posteriormente traccionarse, de tal modo que en este tramo pudiera existir el llamado efecto Bauschinger por plastificación inversa, lo que provoca un límite de proporcionalidad inverso menor debido a las imperfecciones que pudiera contener el material.

La posición de la fibra neutra $\rho = R_i + \lambda t$ depende de la relación R_i/t :

$$\lambda = \begin{cases} 0,33 & \frac{R_i}{t} \leq 0,2 \\ 0,42 & 0,2 \leq \frac{R_i}{t} \leq 4 \\ 0,50 & \frac{R_i}{t} > 4 \end{cases} \quad (2.6.2)$$

De tal forma, que si el doblado no es severo, $\frac{R_i}{t} > 4$, la línea neutra coincidirá con la línea media; en caso contrario, la fibra neutra tiende a acercarse a la cara interna de la chapa. Aunque de forma estándar se usa la expresión (2.6.2), esta no es del todo cierta, la verdad es que λ va variando de 0,33 a 0,5 de forma progresiva a la vez que el ratio R_i/t va aumentando hasta llegar a 4. Con todo ello lo que se quiere decir es que a partir de que el ratio tome un valor de 3, se considerará que la línea neutra coincide con la línea media.

Finalmente, a través de la longitud de la fibra neutra, que se calcula imponiendo la ecuación 2.6.3, se puede calcular la longitud total de la chapa indeformada.

$$d\varepsilon_1 = d\left(\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)\right) = 0 \quad (2.6.3)$$

Y sabiendo que la longitud de una curvatura se calcula multiplicando el ángulo por el radio de dicha curvatura, sumándole las caras la longitud de las caras ideformadas, se obtiene así la longitud total de la chapa indeformada. Pero lo cierto es que la derivada de la ecuación 2.6.3 aumenta cuando el ratio entre el radio de doblado y el grosor de la chapa disminuye, y aunque se suponga que el espesor se mantiene constante la realidad no lo verifica cuando la chapa endurece por deformación, disminuyendo así el espesor del metal. El cálculo de la longitud de la fibra neutra se vuelve complicado entonces, teniendo que basar su cálculo en datos experimentales o estándares como los que proporciona la (ASM International, 1990) o la (Instituto Alemán de Normalización, 1975).

El estándar ASM usa las ecuaciones 2.6.4. y 2.6.5:

$$L_g = (t \cdot p + R_i) \cdot 0,01745 \cdot \beta \quad (2.6.4.)$$

$$\begin{cases} p = \frac{R_i}{t} \cdot 0,04 + 0,3 & \frac{R_i}{t} < 1 \\ p = \left(\frac{R_i}{t} - 1\right) + 0,06 + 0,34 & \frac{R_i}{t} \geq 1 \end{cases} \quad (2.6.5)$$

El estándar DIN utiliza para el acero las ecuaciones 2.6.6, 2.6.7 y 2.6.8:

$$L_0 = a + b + v \quad (2.6.6.)$$

$$v = \pi \cdot \left(\frac{180 - \alpha}{180}\right) \cdot \left(R_i + \frac{1}{2}t + k\right) - 2 \cdot (R_i + t) \quad (2.6.7.)$$

$$k = 0,65 + 0,5 \cdot \log\left(\frac{R_i}{t}\right) \quad (2.6.8.)$$

En todas las ecuaciones los ángulos van en grados y las siglas se representan en la Figura 2.6.5.

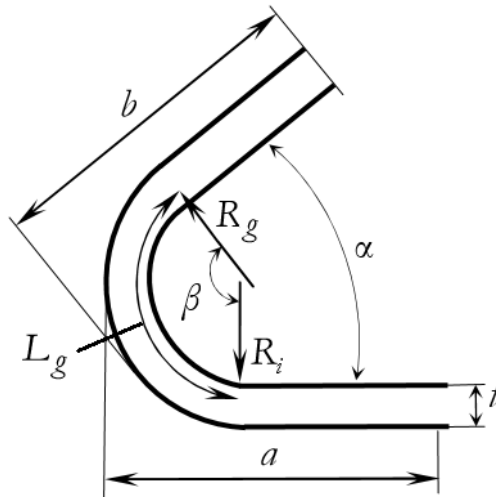


Figura 2.6.5. Representación de los parámetros para el cálculo de la chapa indeformada.

Se especifica que la ASM propone tomar $R_g = R_m$ a partir de que el ratio R_i/t tome un valor de 3,67, mientras que la DIN propone el valor de 5.

2.6.4 Recuperación elástica o *springback*

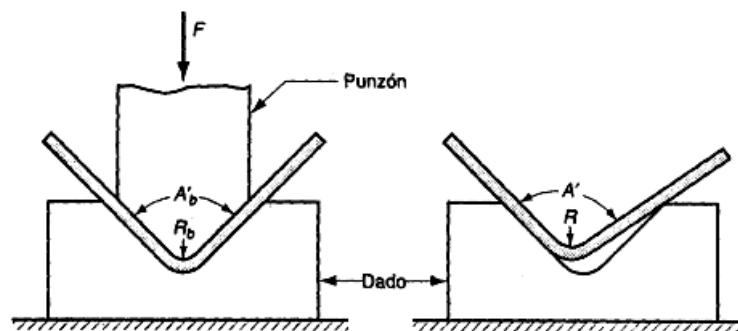


Figura 2.6.6. Representación del fenómeno de recuperación elástica en el proceso de doblado en V.

El fenómeno de la recuperación (Figura 2.6.6), es uno de los más importantes a considerar en un proceso de doblado, sin olvidar que también se manifiesta en otro tipo de procesos, como la embutición, pero no a la misma escala. El *springback* se produce debido a algo de lo que se hablaba en el epígrafe 2.1 de este capítulo, el módulo elástico de los materiales. Como se puede observar en la Figura 2.6.7, cuando un material que ha plastificado deja de ser solicitado, éste siempre descarga recuperando la deformación elástica, lo que da lugar a este fenómeno que se estudia.

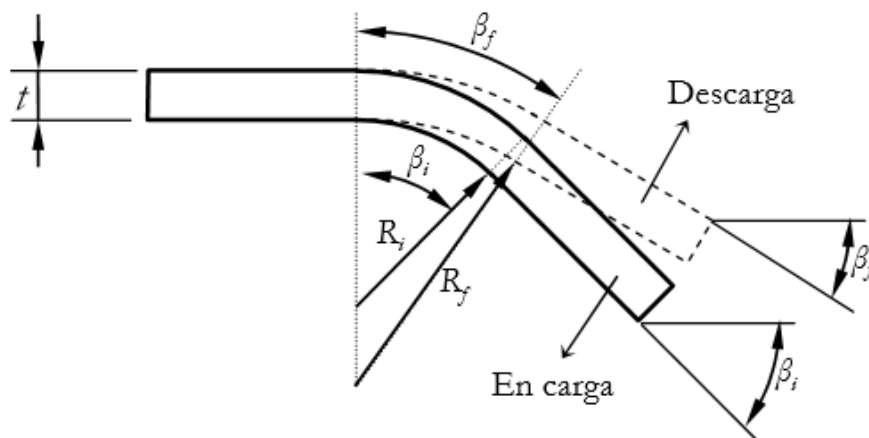


Figura 2.6.7. Esquema de la recuperación elástica.

Para hablar cuantitativamente sobre el fenómeno de recuperación elástica se hace referencia a los ángulos y a los radios iniciales y finales.

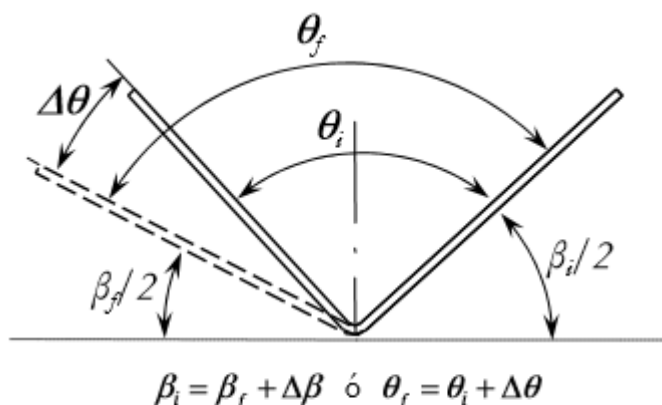


Figura 2.6.8. Caracterización de todos los ángulos del proceso de doblado.

El factor de recuperación angular es cuantificado a través de los incrementos angulares que se muestran en la Figura 2.6.8. También existe otra opción de otro posible parámetro, K_r , como coeficiente entre los ángulos finales e iniciales, ecuación 2.6.9.

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} \quad (2.6.9)$$

Si K_r tiene un valor igual a la unidad, esto indicará ausencia de recuperación, en contraposición, un valor igual a cero llevará a una recuperación elástica completa.

El tipo de recuperación que se representa en la Figura 2.6.8 se denomina como positiva, donde el radio inicial de doblado R_i es menor que el radio final R_f y el ángulo inicial de doblado β_i es mayor que el ángulo final β_f , tendiendo a recuperar la chapa su forma inicial. Siendo $\beta = \pi - \theta$.

Pasando entonces a hacer un análisis de la relación de los radios iniciales y finales de doblado. Incluyendo esta vez las propiedades del material que gobiernan su comportamiento elástico, se desarrolla una fórmula aproximada para estimar la recuperación:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i S_Y}{t \cdot E} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i S_Y}{t \cdot E} \right) + 1 \quad (2.6.10)$$

Donde:

- R_i es el radio inicial, el radio del punzón del ensayo de doblado, el que se desea obtener en la chapa
- R_f es el radio final del doblado, el que se obtiene teniendo en cuenta la recuperación elástica del material
- S_Y es la tensión de fluencia característica del material
- t es el espesor de la chapa
- E es el módulo de Young del metal que se experimenta

Esta ecuación fue desarrollada por primera vez por (Gardinier, 1958) quien hizo un análisis matemático simplificado y generalizado de la recuperación de los metales, considerando como hipótesis necesarias la conservación del espesor y de la longitud del arco. Con ella se hace referencia a que el valor de la recuperación elástica aumenta con el nivel de tensión y con la disminución del módulo elástico.

(Marciniak, 1992) proporciona otra ecuación en función de las hipótesis de simplificación que escoge para obtener el valor de recuperación en la descarga de una chapa con comportamiento elástico-perfectamente plástico. Obtiene un ángulo de recuperación a partir de la ecuación 2.6.11.

$$-\Delta\theta = 3 \left(\frac{S}{E'} \right) \left(\frac{\rho}{t} \right) \theta \quad (2.6.11)$$

Donde:

- $\Delta\theta$ es el valor del ángulo de recuperación elástica
- θ es el valor del ángulo de la matriz que se desea obtener
- S es la tensión de fluencia característica del material
- E' es el módulo elástico del material en condiciones de deformación plana $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$
- ν es el coeficiente de Poisson del material
- t es el espesor de la chapa
- ρ es el radio de curvatura de la línea neutra, $\rho = R + \lambda t$, siendo R el valor del radio de punzón y para λ se tomará siempre el valor de 0,5 para que se cumpla la condición de la ecuación

Esta ecuación proviene de un largo desarrollo con hipótesis simplificativas que se explican a continuación.

Partiendo de la siguiente geometría de una chapa, Figura 2.6.9, (donde R es el radio de plegado, ρ es el radio de la curvatura de la línea media, θ es el ángulo de plegado y t el espesor de la chapa) sometida a un momento flector M .

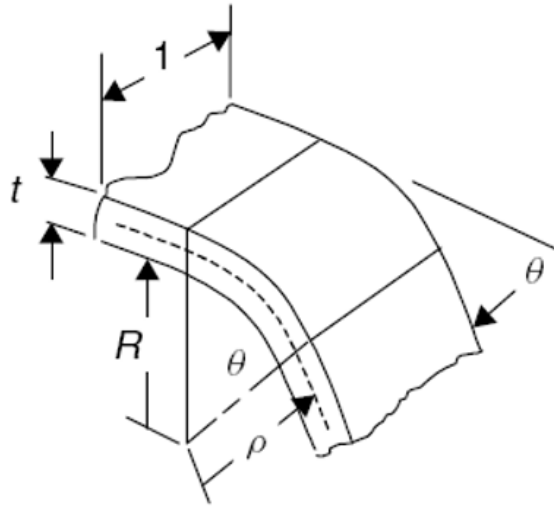


Figura 2.6.9. Geometría de una chapa deformada. (Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

Haciendo la hipótesis de que el radio de curvatura es superior a tres o cuatro veces el espesor de la chapa, implicando con ello que las secciones planas normales a la línea media permanecen planas y normales en la deformada, convergiendo al centro de curvatura (Figura 2.6.10).

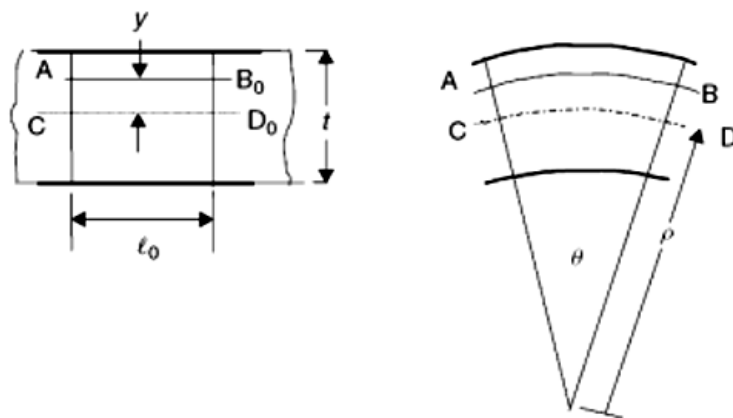


Figura 2.6.10. Representación de la longitud de doblado indeformada y deformada. (Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

Siendo la longitud de la línea media:

$$l_m = \rho\theta \quad (2.6.12)$$

Se define la longitud de la línea AB como:

$$l = (\rho + y)\theta = \rho\theta \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (2.6.13)$$

Por tanto se define la deformación de la línea AB:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(\frac{l_m}{l_0} \frac{l}{l_m} \right) = \ln \frac{l_m}{l_0} + \ln \left(1 + \frac{y}{\rho} \right) = \varepsilon_m + \varepsilon_b \quad (2.6.14)$$

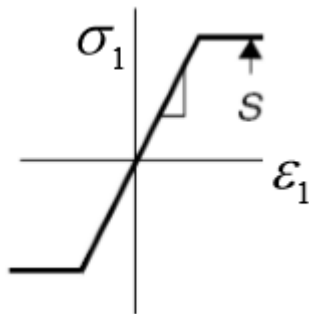
Como se asume que no existe esfuerzo axial y anida esta hipótesis a la del radio de curvatura, se puede asumir que la línea neutra permanece indeformada y sobre la línea media de la chapa. Asumiendo además que $\rho \gg t$, de la ecuación anterior queda que la deformación de flexión:

$$\varepsilon_b \approx \frac{y}{\rho} = \varepsilon_1 \quad (2.6.15)$$

Se asume también condiciones de deformación plana (además de que el material se supone isótropo), propio de piezas de gran longitud en comparación con su espesor. Esto quiere decir que si se descompusiera la chapa en rebanadas idénticamente iguales, perpendicularmente a este plano las deformaciones serían nulas. Con todo ello se supone finalmente que la tensión uniaxial de plastificación es:

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_Y = S \quad (2.6.16)$$

Suponiéndose un comportamiento del material elasto-plástico perfecto y corrigiendo el módulo de Young por deformación plana.



$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_1 = E' \varepsilon_1 \quad \text{si } \sigma_1 < S$$

$$\sigma_1 = S \quad \text{si } \sigma_1 \geq S$$

Figura 2.6.11. Comportamiento elastoplástico perfecto.

(Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

De la ley de comportamiento elástico se tiene que:

$$\frac{E'}{\rho} = \frac{\sigma_1}{y} \quad (2.6.17)$$

Sabiendo que el momento:

$$M = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_1 y \cdot dy = 2 \frac{E'}{\rho} \int_0^{t/2} y^2 \cdot dy = \frac{E' t^3}{12 \rho} \rightarrow \frac{M}{E' I} = \frac{1}{\rho} \quad (2.6.18)$$

El rango elástico llegará a su límite cuando las fibras externas plastifiquen, es decir, cuando:

$$\sigma_1 = \pm S; \quad y = \pm \frac{t}{2} \rightarrow \frac{1}{\rho} \Big|_e = \frac{2S}{E't}; \quad M_e = \frac{St^2}{6} \quad (2.6.19)$$

Se representa entonces en la Figura 2.6.12 el momento respecto a la curvatura durante el rango elástico.

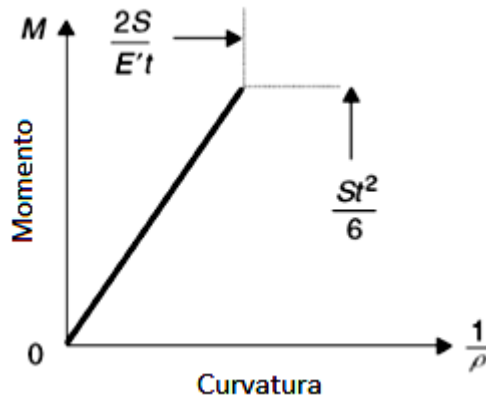


Figura 2.6.12. Representación del momento respecto a la curvatura durante el rango elástico.
(Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

En el comportamiento plástico:

$$\sigma_1 = S \rightarrow M_p = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_1 y \cdot dy = \frac{St^2}{4} \rightarrow M_p = 1,5 M_e \quad (2.6.20)$$

Quedando entonces la representación del momento respecto de la curvatura, sumándole el rango plástico, tal y como se representa en la Figura 2.6.13.

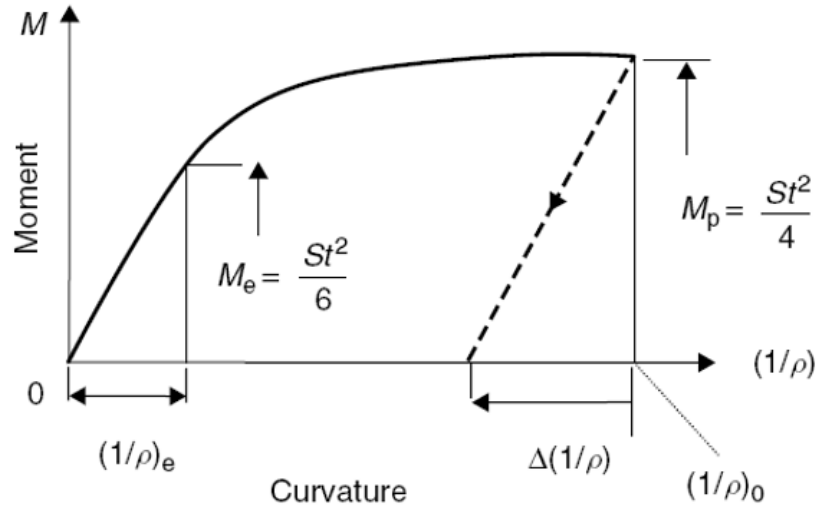


Figura 2.6.13. Representación del momento respecto a la curvatura en el rango elástico y plástico. (Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

Durante el proceso de descarga (Figura 2.6.14) se supone que la línea neutra, que coincide con la línea media, permanece indeformada.

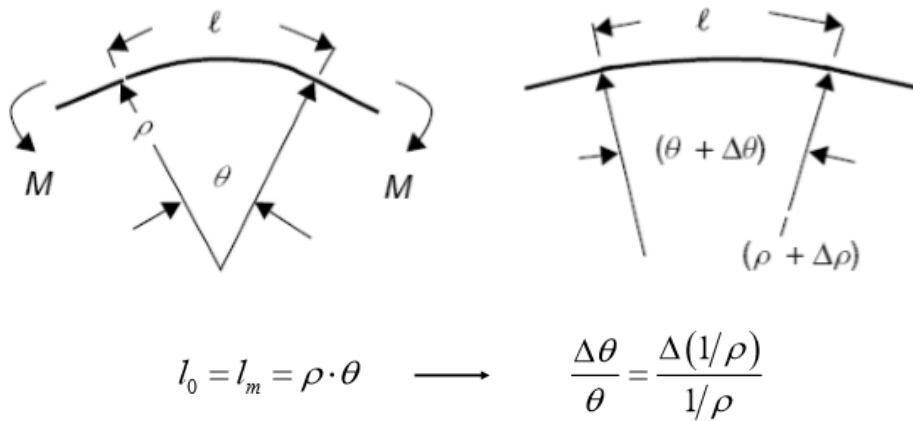


Figura 2.6.14. Representación del proceso de descarga en el doblado. (Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

Además se supone que en el comportamiento elásto-plástico perfecto la descarga es siempre elástica.

Particularizando para el rango elástico se comprueba que se recupera toda la deformación. Para el rango totalmente plástico se tiene que

$$\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right) = -\frac{3S}{E't} \rightarrow \Delta\theta \approx -3\left(\frac{S}{E'}\right)\left(\frac{\rho}{t}\right)\theta \quad (2.6.21)$$

Tal y como se quería demostrar.

Volviendo a observar y analizar las ecuaciones 2.6.10 y 2.6.11 se puede hacer una lista sobre las variables de influencia en el aumento del fenómeno de recuperación elástica, como lo son:

- la disminución del espesor de la chapa, t .
- el aumento del esfuerzo de fluencia, S_y .
- el aumento del radio de doblado, R .
- la disminución del módulo de la elasticidad, E .
- el aumento del módulo tangente (pendiente de la curva esfuerzo/deformación real), cuando se ha excedido el límite de fluencia.

Aunque realmente casi siempre se hablará de forma más general sobre la influencia de los ratios S_y/E y R/t . Otro factor geométrico de muy importante influencia en la cuantificación de la recuperación es el propio ángulo que se quiere alcanzar, θ . Así que tal y como indica la ecuación 2.6.11, a mayor ángulo de doblado pretenda alcanzarse, mayor será la recuperación elástica experimentada por el material.

En resumen, el fenómeno del *springback* será mayor cuando chapas finas de alta resistencia se plieguen con curvaturas suaves. (Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

El fenómeno de la recuperación toma valores en magnitudes muy diferentes que dependen, de forma muy importante, del tipo del material que se solicite para el proceso. Para metales blandos, como por ejemplo aluminios de la serie 1000 con alto porcentaje en aluminio, la cantidad de recuperación es casi insignificante. Por el contrario, para otras aleaciones del mismo material cobra bastante importancia. De esta manera, cuando se diseña una pieza doblada se puede optar por caracterizar el material a través del ensayo de tracción o acudiendo a manuales de consulta específicos donde se recogen tablas en las que se listan los valores de recuperación en grados o tolerancias de doblado en función del material y del ratio de doblado mínimo y/o espesor. A continuación, en la Figura 2.6.15 se muestra un ejemplo de tabla de un material que va a ser usado en este proyecto.

Tabla 2.6.2. Tolerancias de recuperación para doblados de 90° en chapas de aluminio 2024-T3, según la (ASM International, 1990).

Grosor (mm) 2024-T	Radio de doblado (mm)							
	2,4	3,2	4,8	6,4	7,9	9,5	11,1	12,7
0,51	10	12	15 1/2	19	22 1/2	24	27	33 1/2
0,64	8 3/4	10 1/2	14	16 3/4	17 3/4	21	23	28 1/2
0,81	7 3/4	8 3/4	12	14 1/2	16 3/4	17 3/4	19 1/4	24
1,02	7 1/4	8 1/4	10 3/4	12 3/4	14 1/2	15 1/4	17	20 1/2
1,29			9	10 1/2	12 1/4	13	14 1/2	16 3/4
1,63			8	9 3/4	11 1/4	12	12 3/4	15
2,06					9 1/2	10 1/2	11 1/4	13
2,39					8 3/4	9 3/4	10 1/2	12

Aunque parece un hito imposible lo de poder eliminar el fenómeno de la recuperación debido a que todos los materiales tienen un régimen elástico en mayor o menor medida, existen técnicas de compensación como las que se citan a continuación:

- Sobredoblar la pieza en la matriz hasta un ángulo mayor que el deseado para que cuando se produzca la recuperación ésta sea compensada.
- Acuñar la región doblado por sujeción para que los esfuerzos de compresión queden altamente localizados en la punta del punzón y en la superficie de la matriz, asegurando así una mayor deformación plástica.
- Doblar por estiramiento, técnica en la que la pieza se sujeta traccionada mientras se produce el doblado.
- Regolpear la pieza en la matriz original o con utillajes especiales para reducir la recuperación hasta un nivel más bajo.
- Doblado a temperaturas elevadas, disminuyendo así la tensión de fluencia.
- Técnica de doblado doble, en la que el extremo se dobla dos veces en situaciones diferentes con un juego de matriz reducido.

2.6.5 Equipamiento de doblado

Las prensas son las máquinas-herramientas utilizadas en el doblado, algunas de ellas integran componentes y/o deformaciones especiales, con el objetivo de plegar piezas de longitudes mayores. Las constantes exigencias de los clientes en cuanto a la calidad, no sólo en el material, sino en el producto terminado, han causado un aumento en la tecnología, propia de estos equipos, y en el herramental utilizado en dicho proceso (punzón-matriz).

Las matrices más comunes en la industria son las que tienen varias ranuras en V (Figuras 2.6.15.a y 2.6.15.b), característica física que afecta, en gran medida, la rigidez de estas herramientas, provocando influencia negativa en la fuerza del doblado y en el desplazamiento del punzón, dos factores que, a su vez, se traducen en falta de precisión en la pieza. Por tal razón, y para evitar este tipo de inconvenientes, en la actualidad, algunas empresas del sector optan por utilizar en sus procesos productivos, matrices con una sola ranura en V.

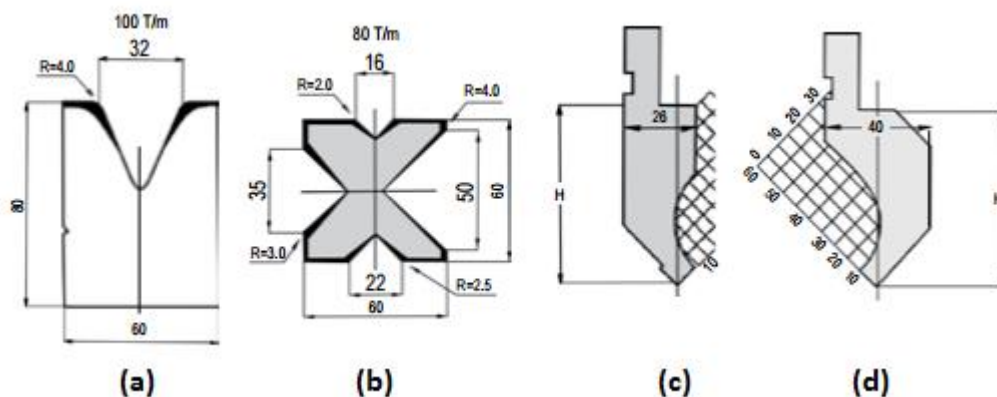


Figura 2.6.15. Equipamiento del doblado. (Castro Patiño, s/f)

En cuanto a los punzones, los más comunes se caracterizan por tener secciones simples, algunos de ellos con una parte cóncava que ayuda a eliminar posibles choques de la herramienta contra el material de trabajo. También se encuentran los llamados “cuellos de ganso” (Figura 2.6.15.c y 2.6.15.d) que, aunque menos comunes en la industria, se utilizan con propósitos muy especiales, particularmente, para el doblado de láminas en forma de U.

Es importante mencionar que la gran mayoría de fabricantes de prensas y las empresas que las utilizan, poseen adaptadores especiales para los punzones de doblado, es por esto que en el mercado no existe una estandarización de este tipo de herramientas y, por lo regular, sólo se acoplan en las máquinas para la cual fueron diseñados.

De otro lado, y debido al surgimiento de nuevos tipos de acero de alta resistencia, las empresas requieren cada vez más herramienta de alta calidad que pueda resistir las fuerzas que se generan durante el doblado; sin embargo, el buen funcionamiento de un punzón o matriz, no sólo está dado por sus niveles de calidad, sino por el buen uso que el operador haga de ellos durante el proceso de trabajo. (Castro Patiño, s/f)

2.6.6 Tensiones residuales y defectos en las piezas

Las tensiones residuales juegan un papel muy importante en los procesos de conformado en frío de una pieza. Teniendo en cuenta que la pieza de partida para el proceso de doblado ha

sido previamente conformada por laminación en frío, la magnitud de estas tensiones puede afectar significativamente al comportamiento del material en procesos posteriores.

En un proceso de doblado la sección conformada contiene también unos esfuerzos residuales como resultado de la operación. El fenómeno de la recuperación está determinado por una compleja interacción de tensiones elásticas residuales internas, sujetas a las restricciones de la geometría de la pieza (Figura 2.6.16).

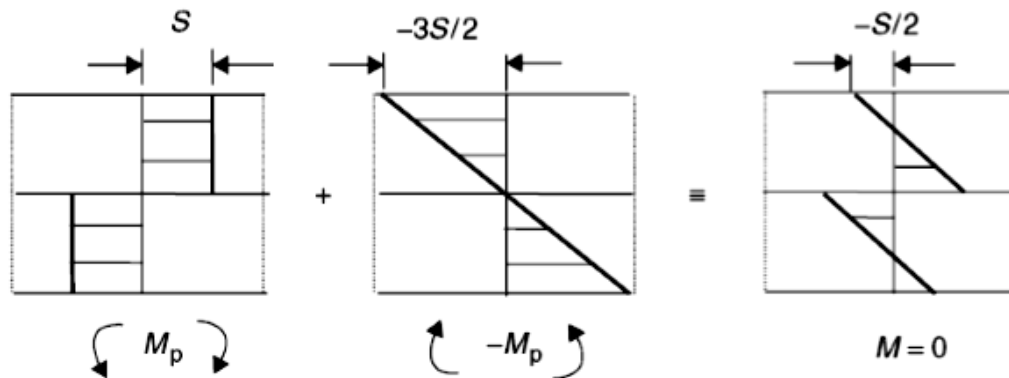


Figura 2.6.16. Tensiones residuales para una descarga desde un momento de flexión totalmente plástico. (Vallellano Martín & García-Lomas Jung, Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa, 2010)

También existen defectos y fallos tales como la aparición de deformaciones no deseadas, la falta de precisión de los ángulos de doblado y de la geometría, el adelgazamiento de las paredes, el aplanamiento de las superficies curvadas, aparición de arrugas y grietas, etc. Todas estas anomalías están en estrecha relación con distintas características del proceso: el diseño de las estampas y los utillajes, las condiciones que definen el conjunto matriz-punzón, la máquina, la selección de proceso y los efectos del material. En resumen, las anomalías están relacionadas con un número muy elevado de parámetros propios de cada proceso de deformación de chapa.

Capítulo 3.

Parte experimental

*La tEOría y la PráCtica difieren cuando
La Experiencia se Opone
a lo que se Predice en un Cuaderno.
María Guillén*

En esta parte del proyecto se trabajará en el taller de mecanizado del Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, haciendo uso de los equipos y materiales disponibles en él, para poder evaluar y analizar el mayor número de variables experimentales posibles.

3.1. Equipos

En este apartado se diferenciarán tres grandes grupos de equipos según su función.

- En un primer grupo, se hablarán de los equipos principales que se utilizarán para llevar a cabo los experimentos propios del proceso de doblado en V.
- En un segundo grupo, se tratarán los equipos necesarios para la fabricación de las probetas que se utilizarán para realizar los experimentos.
- Por último, en el tercer grupo, se tratarán los equipos utilizados en la parte de mediciones de las variables experimentales.

3.1.1. Equipos para el proceso de doblado en V

En este grupo se encuentran los tres equipos principales para la realización de los experimentos de este proyecto, el proceso de doblado en V. Estos tres equipos son similares entre sí, compuestos principalmente por una matriz, un punzón y una base que sostiene y permite el movimiento del punzón hacia la matriz a través de un mecanismo de engranaje, que se ejecuta haciendo girar una manivela.

La principal diferencia de los tres equipos que conforman este grupo es la medida del radio del punzón de cada uno de ellos, siendo ésta una de las variables experimentales del proceso.

A continuación se muestran las distintas imágenes de los distintos equipos: la Figura 3.1.1 ilustra una visión completa del equipo del punzón de radio 2,75 mm, la Figura 3.1.2 muestra el equipo del punzón de radio 5,5 mm y la Figura 3.1.3 el de 12,5 mm.

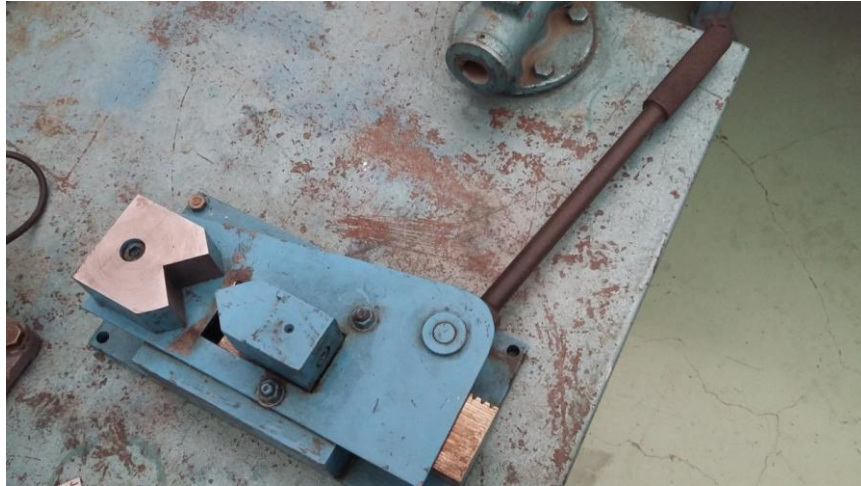


Figura 3.1.1. Equipo completo de doblado con punzón de radio 2,75 mm.



Figura 3.1.2. Equipo de doblado con punzón de radio 5,5 mm.



Figura 3.1.3. Equipo de doblado con punzón de radio 12,5 mm.

Aunque de un principio se dispone de la información de las medidas de los radios descritos (ya que fueron usados en otras prácticas), al final se decide comprobar dichas magnitudes con más precisión en el microscopio óptico (Figura 3.1.4), por si pudiera tener alguna repercusión en el análisis de resultados.

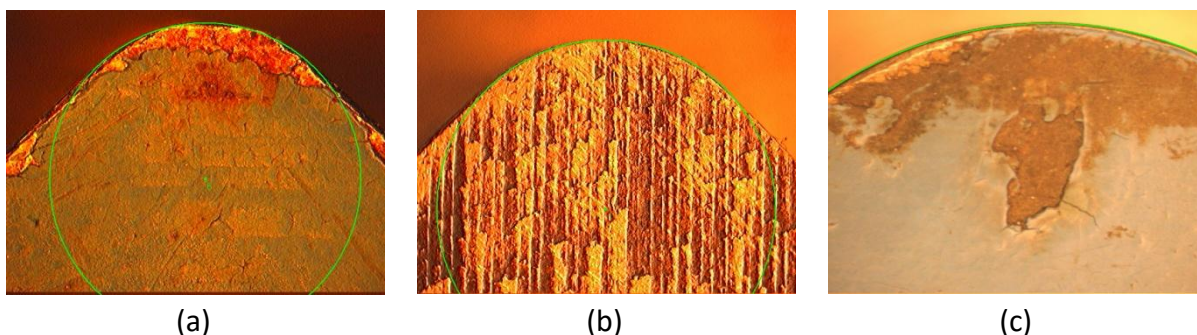


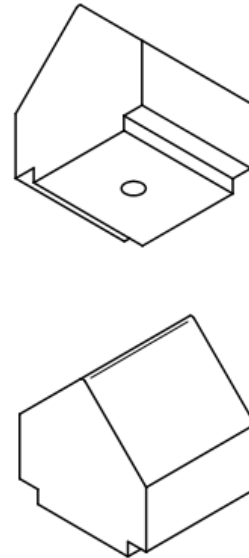
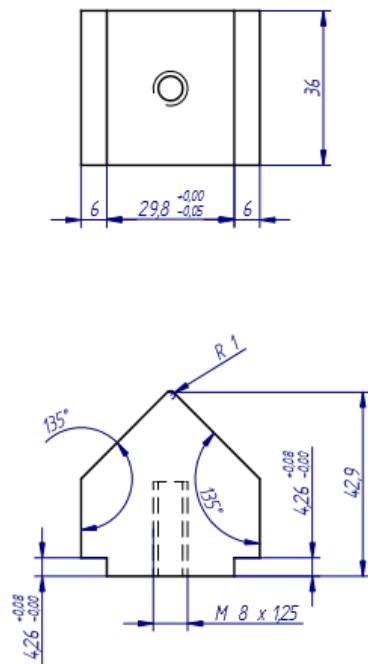
Figura 3.1.4. Medición de radios de los punzones.

- (a) Punzón de radio 2,75 mm, cuya medición en el microscopio es de 2,65 mm
- (b) Punzón de radio 5,5 mm, cuya medición en el microscopio es de 5,51 mm
- (c) Punzón de radio 12,5 mm, cuya medición en el microscopio es de 12,46 mm

Debido a que las diferencias no son significativas, se trabajará con las medidas de las que se disponía en un principio: 2,75 mm, 5,5 mm y 12,5 mm.

También se comprueba con el microscopio óptico que efectivamente el ángulo que forman todos los punzones es de 90° .

La intención en un primer momento era que partiendo de los tres equipos mostrados anteriormente, se fabricara un cuarto punzón con radio 1 mm, para enriquecer esta variable experimental. Desafortunadamente, esta parte del proyecto sólo se quedó plasmado en los planos que se muestran en la Figura 3.1.5, pues el taller externo que se encargaba de fabricarlo no lo tuvo a tiempo. Es por ello por lo que esta parte del trabajo se quedará plasmada en el apartado de trabajos futuros de este proyecto.

PLANO PUNZÓN RADIO 1**NOTAS:**

-uso: ensayo de doblado de chapa

-medidas importantes: R1 y 90°

Se adjuntan fotos

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Figura 3.1.5. Planos del punzón de radio 1 mm y fotos adjuntadas, como aclaración del montaje.

3.1.2 Equipos para el corte de las probetas

En este grupo se encuentran todos los equipos e instrumentación necesarios para la fabricación de las probetas. Sólo se hará una lista exhaustiva en esta apartado para que posteriormente, cuando se hable explícitamente de la fabricación de las probetas de los distintos materiales, se pueda hacer referencia a dicha lista explicando el por qué se ha escogido cada equipo según función y limitación.

A gran escala, para el corte de las planchas se ha hecho uso de una cizalla tal y como muestra la Figura 3.1.6, de una sierra de cinta, Figura 3.1.7, y de una caladora, Figura 3.1.8.



Figura 3.1.6. Cizalla.



Figura 3.1.7. Sierra de cinta.



Figura 3.1.8. Caladora.

Para la eliminación de rebabas y viruta en caliente que generaban los equipos anteriores y que quedaban impregnadas en las probetas, se ha hecho uso de desbarbadores (Figura 3.1.9) y lijas de distintos número (Figura 3.1.10), para un mejor acabado.



Figura 3.1.9. Desbarbador.



Figura 3.1.10. Lima para lijar.

3.1.3 Equipos de medición

Los equipos principales de medidas utilizados han sido el proyector de perfiles que se muestra en la Figura 3.1.11, para la medición de ángulos (apreciación de 1 minuto), y el microscopio óptico, Figura 3.1.12, para la medición de radios de los punzones y distancias microscópicas.



Figura 3.1.11. Proyector de perfiles.



Figura 3.1.12. Microscopio óptico.

Para el control de las medidas de las probetas se empleó un pie de rey como el de la Figura 3.1.13 y una regla de taller.



Figura 3.1.13. Pie de rey empleado.

Para la medición de espesores de las chapas se empleó el calibrador rápido de lectura digital para mediciones exteriores de la Figura 3.1.14.



Figura 3.1.14. Calibrador rápido de lectura digital para mediciones interiores y exteriores de apreciación centesimal.

Para terminar este apartado se mostrarán dos equipos adicionales que se tratarán con más detalle en apartados posteriores y que fueron necesarios para la realización de procesos previos al doblado, con el fin de dotar a algunos materiales experimentales de propiedades no intrínsecas y analizar su efecto en los resultados en el proceso de plegado en V. El primero de los equipos que se muestra en la Figura 3.1.15 es la máquina de ensayo a tracción, la cual se utilizará para aplicar un pretensado al material; en segundo lugar, en la Figura 3.1.16 se puede observar un horno de fundición que será utilizado para dar un tratamiento de recocido de alivio de tensiones.



Figura 3.1.15. Máquina de ensayo de tracción.



Figura 3.1.16. Horno de fundición.

3.2 Materiales

Tal y como se habla en el epígrafe 3.1, las distintas propiedades en la gran variedad de materiales van a hacer que las variables experimentales del proceso se muevan en un rango bastante amplio, variando en gran medida los resultados que se obtienen entre los distintos tipos de materiales. Es por ello que este epígrafe será de gran dimensión, debido a la importancia que tiene conocer los materiales que se trabajan, con el fin de poder explicar su comportamiento cuando son solicitados.

Principalmente en este proyecto se tratarán tres grandes familias de materiales: acero, aluminio y titanio. En el caso del aluminio también se podrán observar las diferencias que existen entre los resultados de un mismo material con diferentes composiciones.

3.2.1 Acero

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos, y es en dichas concentraciones y en la diversidad de tratamientos térmicos aplicados, donde se encuentra la gran diversidad de aceros existentes en el mercado. La clasificación más común de los aceros se hace según el porcentaje del contenido de carbono,

que es el que dota al material de las propiedades mecánicas que lo caracterizan, y se dividen en aceros bajos en carbono, medios y altos.

En la experimentación de este proyecto se utilizará un acero bajo en carbono, los cuales contienen, en general: menos del 0,25% C, manganeso y concentraciones residuales de otras impurezas. El endurecimiento de este tipo de aceros se consigue mediante deformación en frío y no mediante tratamientos térmicos, son relativamente blandos y poco resistentes, pero presentan excelente ductilidad y gran tenacidad, además son mecanizables, soldables y los más económicos del mercado. Sus aplicaciones típicas se ven en algunos componentes del mundo de la automoción, en preformas estructurales, en planchas para tuberías y envases, entre otras.

Dentro de la gran diversidad de aceros existentes en el mercado englobados en los aceros de bajo contenido en carbono, en este trabajo se escoge para experimentar un **Acero DC01 (espesor 0,8 mm)**, cuya ficha técnica se muestra en la Figura 3.2.1.

Calidad : LAF-DC01-A-M-O Según EN 10130										Dimensione: 0.80 X 2000.00X1000.00 4.835 Ton.							
Colada N°	N° BOBINAS	ANALISIS QUIMICO															
501125	S24179	C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Si(%)	Al(%)	Nb(%)	V(%)	Ti(%)	N(%)	B(%)	Cu(%)	Ni(%)	Cr(%)	Mo(%)	
		0.060	0.417	0.016	0.011	0.010	0.053	0.001	0.001	0.001	0.005	0.000	0.016	0.014	0.020	0.002	
Ensayo N	N° BOBINAS	N° Articul	Valores Mecánicos														
			Sent	Rp0.2	Rm	A%	n	r	H								
			Mpa	Mpa	Mpa	A80											
00150371	S24179	4114455	T	198	325	36.0	0.205	2.250	049.0								

Figura 3.2.1. Ficha técnica del Acero DC01, aportada por el fabricante.

En la ficha técnica del acero se indican que las planchas que son suministradas por el fabricante tienen dimensiones de 2 x 1 m, pero realmente de lo que se dispone en el taller cuando se van a realizar los experimentos con dicho material, son retales de dimensiones máximas de 1 x 0,5 m aproximadamente. El estado en el que se encuentra este material es provisto de ondulaciones que se pronuncian, sobretodo, en los extremos (Figuras 3.2.2 y Figura 3.2.3). Debido a que la información que se obtiene del taller es que dichas planchas no han estado sufriendo ningún tipo carga y han sido tratadas adecuadamente, se decide entonces buscar información acerca de este material intentando encontrar alguna razón a sus deformaciones.

Buscando información sobre el acero DC01 se descubre que es un metal dulce laminado en frío para ser suministrado en forma de chapas, tal y como de muestra en la Figura 3.2.2, y son destinados principalmente a procesos de embutición y conformado en frío. Durante el conformado se les aplica un proceso de temperado para eliminar el punto de cedencia (causa de las líneas de Lüder), por lo que deben conformarse antes de un determinado tiempo, ya que envejecen recuperando la discontinuidad en el punto de cedencia, lo que se atenúa con un enderezamiento inmediatamente antes del conformado. Este material siempre es suministrado untado en aceite, evitando así la corrosión de éste y aconsejándose

que se mantenga siempre bañado. Todos los fabricantes aconsejan utilizar los productos de grado DC01 en un plazo no superior a seis semanas a partir de su puesta a disposición. (ALCOA, s/f) (METALASA, s/f) (Unión de Almacenistas de Hierros de España, s/f) (© ArcelorMittal, 2015)



Figura 3.2.2. Plancha de ACDC01, marcado en rojo las ondulaciones que tiene.



Figura 3.2.3. Probeta de ACDC01 primitiva.

Con toda la información obtenida del párrafo anterior, lo primero que se hace es buscar el sello de control de salida de fábrica del material en la ficha técnica, que el propio fabricante aporta cuando es comprado. Se encuentra entonces que “AcelorMittal” (empresa proveedora) fecha el certificado del acero DC01 en el día 22 de septiembre de 2015. Este hecho podría justificar las ondulaciones que se encuentran en el material, el mes de Mayo del año 2016, ocho meses después de ser suministrado. Si se tiene en cuenta la finalidad de dicho material en este proyecto, todo esto podría ser crítico a la hora de sacar las conclusiones sobre este metal.

Intentando buscar aun más información sobre el valor de las propiedades que el fabricante proporciona en la ficha técnica (Figura 3.2.1) se llega al catálogo “AcelorMittal”, donde llama la atención las discrepancias que presenta sobre las propiedades del grado DC01 de acero que comercializa, en comparación con la ficha técnica que se presenta. Asegura un más bajo coeficiente de endurecimiento por deformación “n” y bajo coeficiente de anisotropía “r”, además de dejar la magnitud de las demás propiedades variando en un rango bastante amplio (Figura 3.2.4).

Propiedades mecánicas

Garantía en chapa sin revestir en sentido transversal al laminado.

	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%) $L_0 = 80$ mm $e < 3$ mm	A (%) $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ (mm) $e \geq 3$ mm	r	n
ArcelorMittal 01	140-280	270-400	≥ 28			
ArcelorMittal 02	140-240	270-360	≥ 34		$\geq 1,3$	$\geq 0,16$
ArcelorMittal 03	180-230	280-360	≥ 34		$\geq 1,3$	$\geq 0,17$
ArcelorMittal 04	160-200	280-340	≥ 38		$\geq 1,8$	$\geq 0,19$
ArcelorMittal 05	140-180	270-330	≥ 40		$\geq 1,9$	$\geq 0,21$
ArcelorMittal 06	120-160	270-330	≥ 42		$\geq 2,2$	$\geq 0,22$
ArcelorMittal 07	100-140	250-310	≥ 44		$\geq 2,5$	$\geq 0,24$

Figura 3.2.4. Ficha de propiedades mecánicas que proporciona el catálogo del mismo fabricante del Acero DC01, que se experimenta.
(© ArcelorMittal, 2006)

Por curiosidad, se decide buscar en el mercado las propiedades que ofrecen otros fabricantes acerca de este material, obteniendo muestras de catálogos de empresas como las de “Hierros y Aceros de Santander, S.A.” y “METALASA” (Figura 3.2.5), entre otros, asegurando así que todos ofrecen más o menos las mismas características de este acero de bajo contenido en carbono.

Composición y características

COMPOSICIÓN QUÍMICA % según EN 10130					
	C	Mn	P	S	Ti ⁽¹⁾
DC01	$\leq 0,12$	$\leq 0,60$	$\leq 0,045$	$\leq 0,045$	-
DC03	$\leq 0,10$	$\leq 0,45$	$\leq 0,035$	$\leq 0,035$	-
DC04	$\leq 0,08$	$\leq 0,40$	$\leq 0,030$	$\leq 0,030$	-
DC05	$\leq 0,06$	$\leq 0,35$	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$	$\leq 0,30$
DC06	$\leq 0,02$	$\leq 0,25$	$\leq 0,020$	$\leq 0,020$	$\leq 0,20$

(1) el Ti puede ser reemplazado por Nb

CARACTERÍSTICAS MECANICAS según EN 10130							
	Dirección	Espesor	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A ₈₀ (%)	r ₉₀	n ₉₀
DC01	T	0,3 - 0,5	140 - 320	270-410	≥24	-	-
		0,5 - 0,7	140 - 300		≥26		
		0,7 - 3	140 - 280		≥28		
DC03	T	0,3 - 0,5	140 - 280	270-370	≥30	≥1,3	≥0,16
		0,5 - 0,7	140 - 260		≥32		
		0,7 - 3	140 - 240		≥34		
DC04	T	0,3 - 0,5	140 - 250	270-350	≥34	≥1,6	≥0,18
		0,5 - 0,7	140 - 230		≥36		
		0,7 - 3	140 - 210		≥38		
DC05	T	0,3 - 0,5	140 - 220	270-330	≥36	≥1,9	≥0,20
		0,5 - 0,7	140 - 200		≥38		
		0,7 - 3	140 - 180		≥40		
DC06	T	0,3 - 0,5	140 - 210	270-350	≥37	≥2,1	≥0,22
		0,5 - 0,7	140 - 190		≥39		
		0,7 - 3	120 - 170		≥41		
DC07	T	0,3 - 0,5	100 - 170	250 - 310	≥42	≥2,5	≥0,23
		0,5 - 0,7	100 - 150		≥44		
		0,7 - 3					

Figura 3.2.5. Ficha técnica del Acero DC01 en el catálogo de otros fabricantes.
(METALASA, s/f)

3.2.2 Aluminio

En general, el aluminio y sus aleaciones se caracterizan por presentar una densidad relativamente baja, de $2,7 \text{ g/m}^3$, elevada conductividad eléctrica y térmica y una buena resistencia a la corrosión en algunos ambientes comunes, incluyendo el ambiente atmosférico. El hechurado del aluminio puro y de muchas de sus aleaciones es de elevada facilidad debido a su alta ductilidad, tanto que puede llegar a convertirse en papel para enrollar. Pero la principal limitación de este material es su baja temperatura de fusión (660°C), limitando su temperatura máxima de funcionamiento. La resistencia mecánica del aluminio se puede mejorar mediante el trabajo en frío o añadiendo elementos aleantes, aunque el precio a pagar está en que ambas alternativas reducen la resistencia a la corrosión.

La composición de los aluminios se caracteriza por un número de cuatro dígitos, seguido de un guión con la denominación del tratamiento aplicado. En lo que concierne a este proyecto se tratarán tres tipos de aluminios muy diferentes entre sí.

- **Aluminio 2024T3 de espesores 1,2 mm y 1,6 mm.**

Al igual que del acero, el fabricante donde se compra este material para el ensayo, proporciona las características de éste, mostradas en la Figura 3.2.6.

CUSTOMER PO NUMBER: 4500038544		WORK PACKAGE: SH-AIR-MAZ-T		CUSTOMER PART NUMBER: 20684		SHIP RUN/LOAD: 102824/16		GOV'T CONTRACT NUMBER:		
KAISER ORDER NO: 1163095		LINE ITEM: 1	SHIP DATE: 10-JAN-2014	ALLOY: 2024	CLAD: BARE	TEMPER: T3	PRODUCT DESCRIPTION: HT Flat Sheet			
WEIGHT SHIPPED: 5017 LB		QUANTITY: 214 PCS EST.		TRUCK B/L #: 2045851		GAUGE: 1.2000 MM (0.0472 IN)		DIAMETER/WIDTH: 1250.0 MM (49.210 IN)		LENGTH: 2500.0 MM (98.430 IN)

Lot: 761293A0

Cast 649

Drop 19

Ingot 1

Parent Lot: 663515A5 Melted in USA

(ASTM E8/B557)

(EN 2002-1)

Tensile:	Temper	Dir / # Tests	Ultimate KSI (MPA)	Yield KSI (MPA)	Elongation %
	T3	LT / 2 (Min:Max)	68.0 : 68.0 (469 : 469)	45.5 : 45.6 (314 : 314)	18.6 : 18.7

Figura 3.2.6. Ficha técnica del Aluminio 2024T3, proporcionada por el fabricante.

La composición 2024 hace referencia a un material con composiciones aptas para tener un aluminio con buena maquinabilidad y apto para un buen acabado superficial, un material de alta resistencia para una adecuada maleabilidad. La designación T3 hace referencia a un tratamiento térmico de solución, seguido de trabajo en frío y envejecimiento natural. Los usos más frecuentes de este tipo de aluminios se encuentran en accesorios de aeronaves, engranajes y ejes, pernos, piezas de reloj y de computadoras, etc.

De este mismo material se trabajarán dos espesores, uno de 1,2 mm y otro de 1,6 mm. Aunque la ficha original que se muestra en la Figura 3.2.6 corresponde a la de menor espesor, se utilizarán los mismos datos del material en ambos casos, debido a que la diferencia que podría existir sería pequeña. En la Figura 3.2.7 se ilustra una pequeña porción de la plancha de Aluminio 2024T3 de longitud 2 x 1 m y de espesor 1,6 mm.

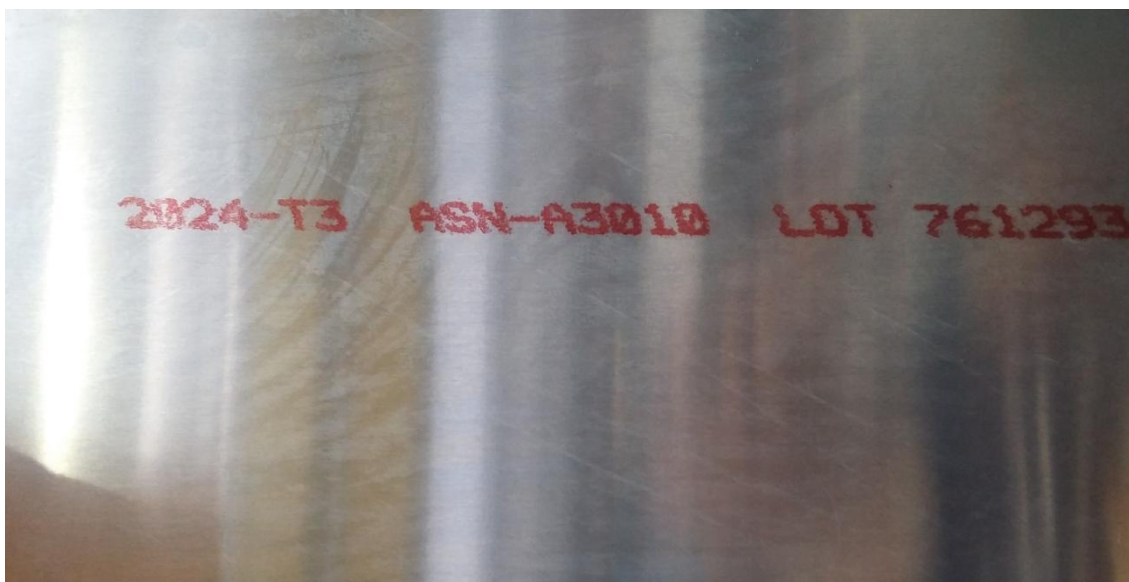


Figura 3.2.7. Porción de plancha de AL2024T3.

- **Aluminio 1050H14, espesor 3 mm.**

Aunque de este material no se dispone de la ficha técnica del fabricante, se busca una ficha que caracterice las propiedades del material, pudiendo variar de la original, imposible de conseguir, pero sólo a pequeña escala se supone.

Del fabricante “ALACER MAS” se encuentra la ficha técnica de este tipo aluminio y se seleccionan las propiedades que serán de interés para este proyecto, Figura 3.2.8.

Como se puede observar, un material muy puro con un elevadísimo porcentaje en aluminio, dotando así al material de una excelente resistencia a la corrosión, con una alta ductilidad y una excelente brillantez en su acabado superficial. No es tratable térmicamente y es usado para trabajos de chapa en general que requieren de fuerza moderada, tales como reflectores de luz o revestimiento de cables.

Como ya se observara en epígrafes sucesivos, para este material se parte de una plancha de 2 x 1 m que se hace bastante difícil de manejar, Figura 3.2.9. En la foto se puede ver perfectamente la brillantez que caracteriza a este material y observando con más

detenimiento imagen, se ve que parte de la plancha está cubierta con cinta de carrozero para que el aluminio no sea dañado cuando se someta al proceso de corte.

-1050- (ALUMINIO PURO 99,5%)

COMPOSICIÓN QUÍMICA

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
Mínimo										
Máximo	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05		0,07	0,05	0,03	99,5

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)

Estado	Espesor mm	Características a la tracción					Dureza	
		Carga de rotura Rm, N/mm ²	Límite elástico Rp 0,2, N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²	Brinell (HB)	Vickers
F	3,2 < e < 150	65		20			20	
0-H111	0,35 < e < 12	65-95	20	42	50	60	21	20
H14	0,35 < e < 12	100-140	105	10	70	70	35	36
H24	0,35 < e < 6	100-140	105	10	70	70	35	36
H16	0,35 < e < 3,2	120-160	120	7			39	
H26	0,35 < e < 3,2	120-160	120	7			39	
H18	0,35 < e < 3,2	150	140	6	100	85	43	44

PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)

Módulo elástico N/mm ²	Peso específico g/cm ³	Intervalo de fusión °C	Coefficiente de dilatación lineal 1/10 ⁻⁶ K	Conductividad térmica W/m K	Resistividad eléctrica a 20°C - $\mu\Omega$ cm	Conductividad eléctrica % IACS	Potencial de disolución V
69,000	2,70	646-657	23,5	229	2,9	59,5	-0,84

Figura 3.2.8. Composición y propiedades mecánicas y físicas del Aluminio 1050.
(ALACER MAS, s/f)

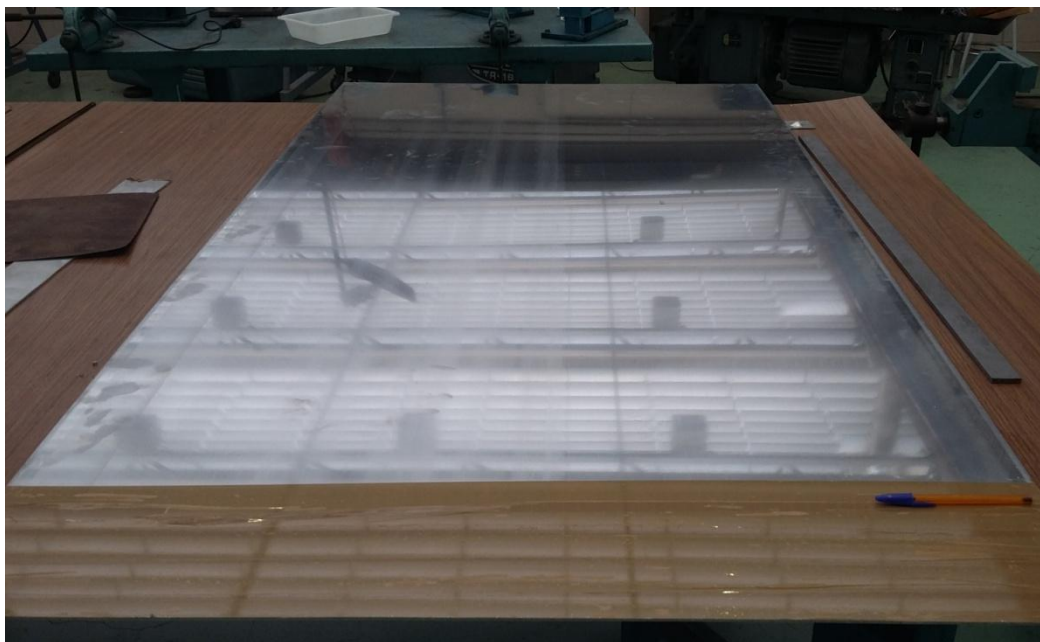


Figura 3.2.9. Tamaño de partida de la plancha de Aluminio 1050H14.

- **Aluminio 7075T6, espesor 3,15 mm.**

Esta serie de aluminios 7XXX se caracterizan sobre todo por su alta dureza, es por ello que se suele usar en las estructuras de los aviones, equipos móviles y otras partes altamente forzadas. Concretamente, el aluminio 7075 tiene un porcentaje en zinc que ronda el 6% y entre un 2% y un 3% de magnesio para hacer la aleación tratable térmicamente, además de algo de cobre y cromo, principalmente. Las siglas T6 hacen referencia a que el material ha sido sometido a un tratamiento térmico de solución y envejecimiento artificial.

Debido a los usos comunes de este material, se decide buscar una ficha técnica que asemeje las propiedades mecánicas de este aluminio, en un catálogo de metales en la industria aeroespacial, “ASM Aerospace Specification Metals Inc.”, y que se muestra en la Figura 3.2.10.

Mechanical Properties			
Hardness, Brinell	150	150	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	191	191	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	53.5	53.5	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	87	87	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	175	175	Converted from Brinell Hardness Value
Ultimate Tensile Strength	<u>572 MPa</u>	83000 psi	AA; Typical
Tensile Yield Strength	<u>503 MPa</u>	73000 psi	AA; Typical
Elongation at Break	<u>11 %</u>	11 %	AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
Elongation at Break	<u>11 %</u>	11 %	AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
Modulus of Elasticity	<u>71.7 GPa</u>	10400 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Poisson's Ratio	0.33	0.33	
Fatigue Strength	<u>159 MPa</u>	23000 psi	AA; 500,000,000 cycles completely reversed stress; RR Moore machine/specimen

Figura 3.2.10. Ficha Técnica Aluminio 7075T6.
(Aerospace Specification Metals INC., s/f)

También se compara con otros fabricantes como “ALCOA” o “CRP MECCANICA”, verificando que las propiedades mecánicas de este aluminio rondan los mismos valores.

A continuación, en la Figura 3.2.11, se muestra el estado superficial de la plancha de Aluminio 7075T6. Las medidas de la plancha de partida serán iguales a la del Aluminio 1050, 2 x 1 m, lo que dificultará la preparación de las probetas, más en este caso que se está tratando un material de mucha más dureza.

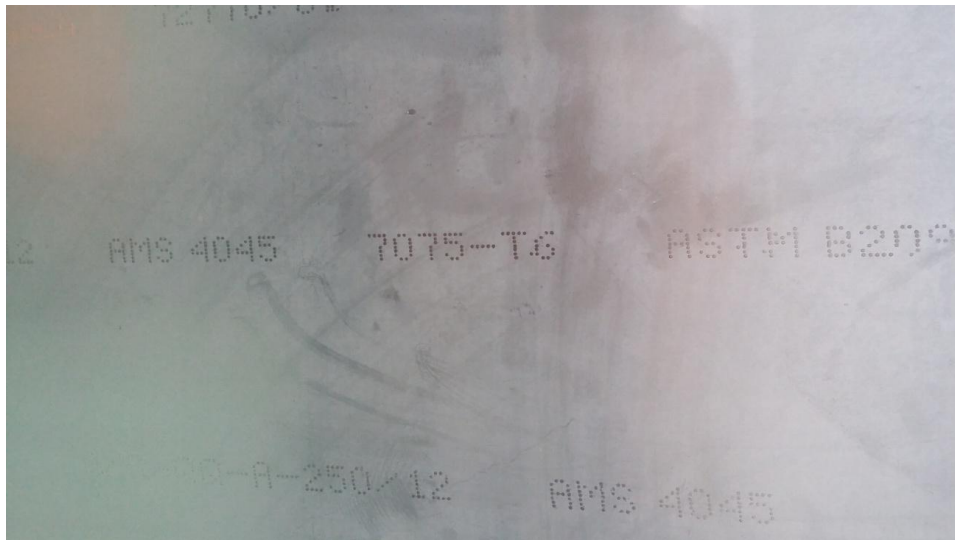


Figura 3.2.11. Plancha de Aluminio 7075T6.

Como se puede observar, la gran diversidad de aluminios existentes en el mercado debido a la gran variedad de composiciones aplicables y tratamientos a los que pueden ser sometidos, darán lugar a comportamientos muy diferentes entre los distintos aluminios. Esto se verá reflejado en el valor que toma el límite elástico para los diferentes tipos de aluminios como se muestra en la gráfica de la Figura 3.2.12.

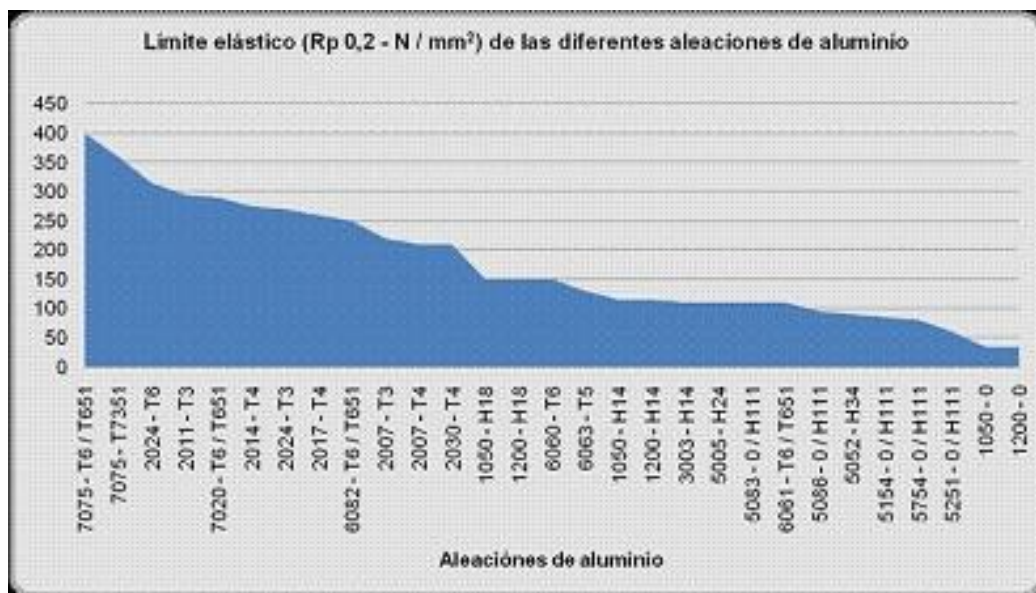


Figura 3.2.12. Valor del límite elástico para las diferentes aleaciones de aluminio.
(Propiedades Mecánico-Químicas del Aluminio, s/f)

3.2.3 Titanio

El titanio y sus aleaciones son materiales de ingeniería relativamente nuevos que poseen una extraordinaria combinación de propiedades. Las características del metal puro son: una densidad relativamente baja, de $4,5 \text{ g/cm}^3$; un punto de fusión alto, de 1668°C ; y un módulo elástico de 107 GPa . Las aleaciones de titanio son muy resistentes, dúctiles y fácilmente forjables y manejables.

Concretamente, en la parte experimental del proyecto se utiliza una aleación de titanio **Ti-6Al-4V (espesor 0,5 mm)**, cuya composición en peso, como su propia designación indica, es de 6 % aluminio, 4 % vanadio, y el resto de titanio. Este material tiene unas condiciones de recocido y unas propiedades mecánicas promedio de 947 MPa de resistencia a tracción, un límite elástico de 877 MPa y una ductilidad 14 % en reducción de área en 50 mm. Sus aplicaciones típicas son de implantes y prótesis de alta resistencia, equipos de procesamiento químico, componentes estructurales de fuselajes, etc.

Y es que el titanio es uno de los materiales de coste más elevado en el mercado de materiales, pues su principal limitación de reactividad química con otros materiales a temperaturas elevadas, ha hecho necesario el desarrollo de procesos no convencionales de fusión, refinado y fundición, además de la inmunidad en gran variedad de condiciones atmosféricas, ambientes marinos y entornos industriales. Todo ello lo dota de ser un primor de material tanto en la industria aeroespacial, como en la automovilística, pasando por la biomecánica y llegando a las industrias químicas y petroquímicas.

Del fabricante “CRP MACCANICA” se deciden extraer los datos que serán necesarios de las propiedades mecánicas de este material (Figura 3.2.13), habiéndolo comparado una vez más con los mismos fabricantes del último aluminio explicado.

Tensile Strength, Ultimate	950 MPa	138000 psi	
Tensile Strength, Yield	880 MPa	128000 psi	
Elongation at Break	14 %	14 %	
Reduction of Area	36 %	36 %	
Modulus of Elasticity	113.8 GPa	16500 ksi	
Compressive Yield Strength	970 MPa	141000 psi	
Notched Tensile Strength	1450 MPa	210000 psi	K_t (stress concentration factor) = 6.7
Ultimate Bearing Strength	1860 MPa	270000 psi	$e/D = 2$
Bearing Yield Strength	1480 MPa	215000 psi	$e/D = 2$
Poisson's Ratio	0,2375	0,2375	

Figura 3.2.13. Propiedades Mecánicas del Ti-6Al-4V, AMS 4911.

(CRP MECCANICA S.r.l., s/f)

Hay que decir que el material este se extrae de un pequeño retal que existe en el taller, de pequeñas dimensiones (Figura 3.2.14), y cuyas designaciones están inscritas en la plancha.

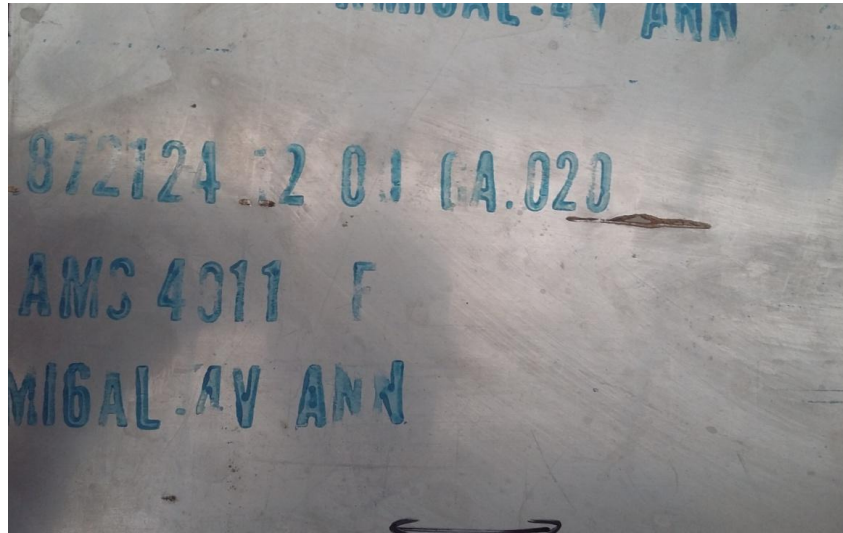


Figura 3.2.14. Plancha de Ti-6Al-4V, AMS 4911.

A continuación se hace resumen de los valores de las propiedades de todos los materiales que van a ser necesarias en los análisis del proceso de doblado, todo ello recogido en la Tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1. Resumen de propiedades mecánicas de los distintos materiales.

MATERIAL	Espesor, t [mm]	Tensión de Fluencia, S [MPa]	Módulo de la Elasticidad, E [GPa]	Coefficiente de Poisson, ν
ACDC01	0,8	198	210	0,3
AL2024T3	1,2	314	73	0,33
AL2024T3	1,6	314	73	0,33
AL1050H14	3	105	69	0,33
AL7075T6	3,15	503	71,7	0,33
TI-6AL-4V	0,5	880	113,8	0,2375

Al igual que con los radios, también se decide comprobar con el calibrador rápido de lectura digital las medidas de los espesores de los distintos materiales (Tabla 3.2.2), viendo que la variación es insignificante en comparación con la que se indica en la ficha técnica.

Tabla 3.2.2. Comparación de espesores de los materiales indicados en la ficha técnica y medidos con el calibrador.

MATERIAL	ESPESOR TÉCNICO [mm]	ESPESOR MEDIDO [mm]
AC DC01	0,8	0,790
AL 2024T3 (1,2)	1,2	1,185
AL 2024T3 (1,6)	1,6	1,665
AL 1050H14	3,0	2,965
AL 7075T6	3,15	3,170
TI 6AL-4V	0,5	0,550

3.3 Probetas

A la hora de realizar los experimentos del ensayo de doblado, lo primero en lo que se debe pensar es en la fabricación de las probetas, atendiendo a las medidas de los equipos, para que el proceso se pueda llevar a cabo. Aunque en un principio se pensó en unas dimensiones de igual magnitud para todas las probetas, se tuvieron que variar algunas de las medidas por el material disponibles por lo que las probetas serán diferentes según el material.

Partiendo de las planchas que se mostraban en el epígrafe 3.2, lo primero que se ha de hacer es averiguar y marcar la dirección de la laminación en las planchas. Unas de las variables que se analizarán en este proyecto será ver la influencia que tiene el fenómeno de la recuperación elástica, cuando el ensayo de doblado se realiza en la dirección de la laminación y transversalmente a ella. A continuación, se muestran los dos casos más extremos que se encuentran en este trabajo, la gran dificultad de ver las direcciones “L” y “T” (transversal a la laminación) en el acero (Figura 3.3.1), y la gran facilidad de averiguarlas en el aluminio (Figura 3.3.2), especialmente en la brillantez superficial que caracteriza al Aluminio 1050.

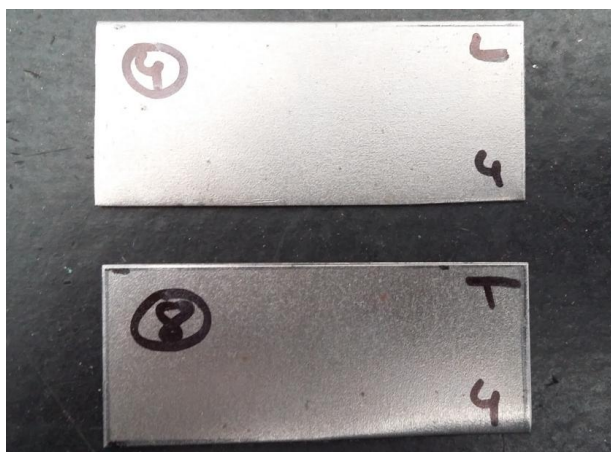


Figura 3.3.1. Probetas L y T de acero.

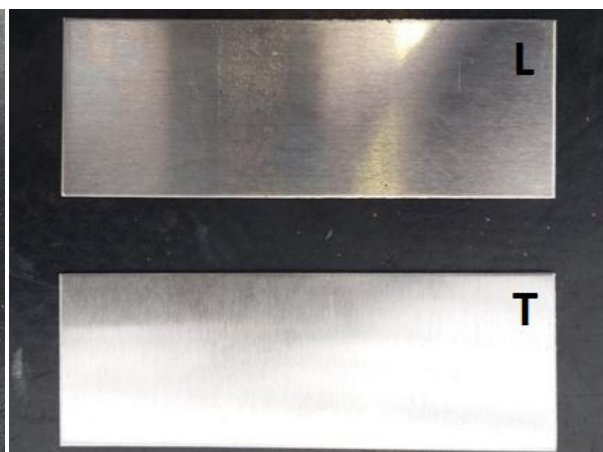


Figura 3.3.2. Probetas L y T de aluminio.

Una vez se tiene claro la dirección de laminación, seguidamente se marcan las probetas con un rotulador indeleble en las planchas, tal y como se muestran en la Figura 3.3.3.

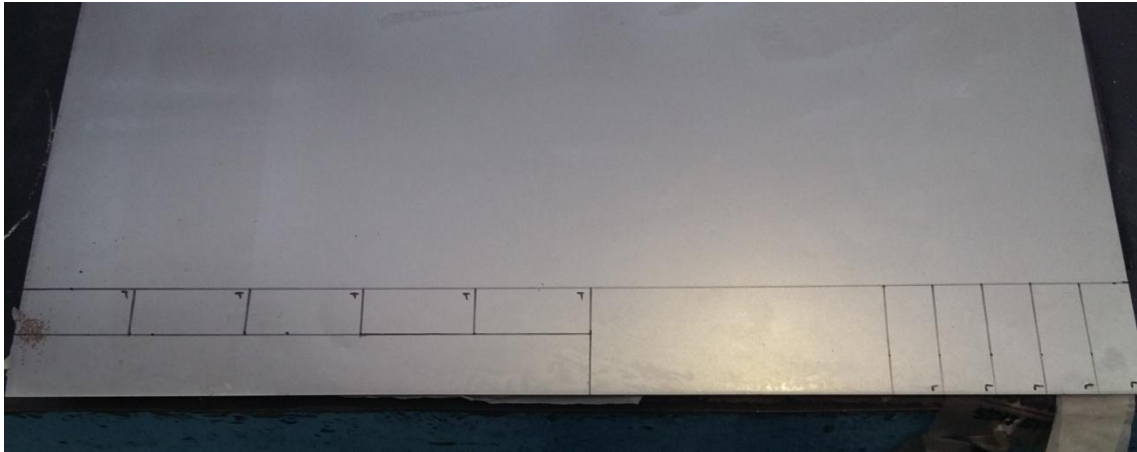


Figura 3.3.3. Marcado de las probetas L y T en plancha de acero.

Este mismo proceso se repite para todas las planchas metálicas de los diferentes materiales de los que se dispone, pero antes ha de marcarse un sistema de designación alfanumérico para las probetas que se corresponde con las variables experimentales a realizar y que se muestra en la Tabla 3.3.1.

Tabla 3.3.1. Sistema de designación alfanumérico para todas las probetas a experimentar.

NÚMERO PROBETA	MATERIAL	ESPESOR [mm]	DIRECCIÓN	PRETENSADO /RECOCIDO	RADIO [mm]	DESIGNACIÓN
1	AC DC01	0,8	L	NO/NO	1	AC08L0R1
2	AC DC01	0,8	L	NO/NO	2,75	AC08L0R2
3	AC DC01	0,8	L	NO/NO	5,5	AC08L0R3
4	AC DC01	0,8	L	NO/NO	12,5	AC08L0R4
5	AC DC01	0,8	T	NO/NO	1	AC08T0R1
6	AC DC01	0,8	T	NO/NO	2,75	AC08T0R2
7	AC DC01	0,8	T	NO/NO	5,5	AC08T0R3
8	AC DC01	0,8	T	NO/NO	12,5	AC08T0R4
9	AC DC01	0,8	L	SI/NO	1	AC08L1R1
10	AC DC01	0,8	L	SI/NO	2,75	AC08L1R2
11	AC DC01	0,8	L	SI/NO	5,5	AC08L1R3
12	AC DC01	0,8	L	SI/NO	12,5	AC08L1R4
13	AC DC01	0,8	T	SI/NO	1	AC08T1R1
14	AC DC01	0,8	T	SI/NO	2,75	AC08T1R2
15	AC DC01	0,8	T	SI/NO	5,5	AC08T1R3

Tabla 3.3.1. Cont. Sistema de designación alfanumérico para todas las probetas a experimentar.

NÚMERO PROBETA	MATERIAL	ESPESOR [mm]	DIRECCIÓN	PRETENSADO /RECOCIDO	RADIO [mm]	DESIGNACIÓN
16	AC DC01	0,8	T	SI/NO	12,5	AC08T1R4
17	AL 2024T3	1,2	L	NO/NO	1	AL12L0R1
18	AL 2024T3	1,2	L	NO/NO	2,75	AL12L0R2
19	AL 2024T3	1,2	L	NO/NO	5,5	AL12L0R3
20	AL 2024T3	1,2	L	NO/NO	12,5	AL12L0R4
21	AL 2024T3	1,2	T	NO/NO	1	AL12T0R1
22	AL 2024T3	1,2	T	NO/NO	2,75	AL12T0R2
23	AL 2024T3	1,2	T	NO/NO	5,5	AL12T0R3
24	AL 2024T3	1,2	T	NO/NO	12,5	AL12T0R4
25	AL 2024T3	1,6	L	NO/NO	1	AL16L0R1
26	AL 2024T3	1,6	L	NO/NO	2,75	AL16L0R2
27	AL 2024T3	1,6	L	NO/NO	5,5	AL16L0R3
28	AL 2024T3	1,6	L	NO/NO	12,5	AL16L0R4
29	AL 2024T3	1,6	T	NO/NO	1	AL16T0R1
30	AL 2024T3	1,6	T	NO/NO	2,75	AL16T0R2
31	AL 2024T3	1,6	T	NO/NO	5,5	AL16T0R3
32	AL 2024T3	1,6	T	NO/NO	12,5	AL16T0R4
33	AL 1050H14	3,0	L	NO/NO	1	AL30L0R1
34	AL 1050H14	3,0	L	NO/NO	2,75	AL30L0R2
35	AL 1050H14	3,0	L	NO/NO	5,5	AL30L0R3
36	AL 1050H14	3,0	L	NO/NO	12,5	AL30L0R4
37	AL 1050H14	3,0	T	NO/NO	1	AL30T0R1
38	AL 1050H14	3,0	T	NO/NO	2,75	AL30T0R2
39	AL 1050H14	3,0	T	NO/NO	5,5	AL30T0R3
40	AL 1050H14	3,0	T	NO/NO	12,5	AL30T0R4
41	AL 7075T6	3,15	L	NO/NO	1	AL32L0R1
42	AL 7075T6	3,15	L	NO/NO	2,75	AL32L0R2
43	AL 7075T6	3,15	L	NO/NO	5,5	AL32L0R3
44	AL 7075T6	3,15	L	NO/NO	12,5	AL32L0R4
45	AL 7075T6	3,15	T	NO/NO	1	AL32T0R1

Tabla 3.3.1. Cont. Sistema de designación alfanumérico para todas las probetas a experimentar.

NÚMERO PROBETA	MATERIAL	ESPESOR [mm]	DIRECCIÓN	PRETENSADO /RECOCIDO	RADIO [mm]	DESIGNACIÓN
46	AL 7075T6	3,15	T	NO/NO	2,75	AL32T0R2
47	AL 7075T6	3,15	T	NO/NO	5,5	AL32T0R3
48	AL 7075T6	3,15	T	NO/NO	12,5	AL32T0R4
49	TI-6AL-4V	0,5	L	NO/NO	1	TI05L0R1
50	TI-6AL-4V	0,5	L	NO/NO	2,75	TI05L0R2
51	TI-6AL-4V	0,5	L	NO/NO	5,5	TI05L0R3
52	TI-6AL-4V	0,5	L	NO/NO	12,5	TI05L0R4
53	TI-6AL-4V	0,5	T	NO/NO	1	TI05T0R1
54	TI-6AL-4V	0,5	T	NO/NO	2,75	TI05T0R2
55	TI-6AL-4V	0,5	T	NO/NO	5,5	TI05T0R3
56	TI-6AL-4V	0,5	T	NO/NO	12,5	TI05T0R4
57	AC DC01	0,8	L	NO/SI	1	AC08L2R1
58	AC DC01	0,8	L	NO/SI	2,75	AC08L2R2
59	AC DC01	0,8	L	NO/SI	5,5	AC08L2R3
60	AC DC01	0,8	L	NO/SI	12,5	AC08L2R4
61	AC DC01	0,8	T	NO/SI	1	AC08T2R1
62	AC DC01	0,8	T	NO/SI	2,75	AC08T2R2
63	AC DC01	0,8	T	NO/SI	5,5	AC08T2R3
64	AC DC01	0,8	T	NO/SI	12,5	AC08T2R4
65	AL 2024T3	1,2	L	SI/NO	2,75	AL12L1R2
66	AL 2024T3	1,2	T	SI/NO	2,75	AL12T1R2
67	AL 2024T3	1,6	L	SI/NO	2,75	AL16L1R2
68	AL 2024T3	1,6	T	SI/NO	2,75	AL16T1R2

A continuación, se mostrarán en la Figura 3.3.4 todas las imágenes de las probetas cortadas, desbardadas y pulidas. Posteriormente, se procederá a la explicación de cómo ha sido su fabricación según el tamaño de la plancha original, la dureza del material e instrumentación disponible.

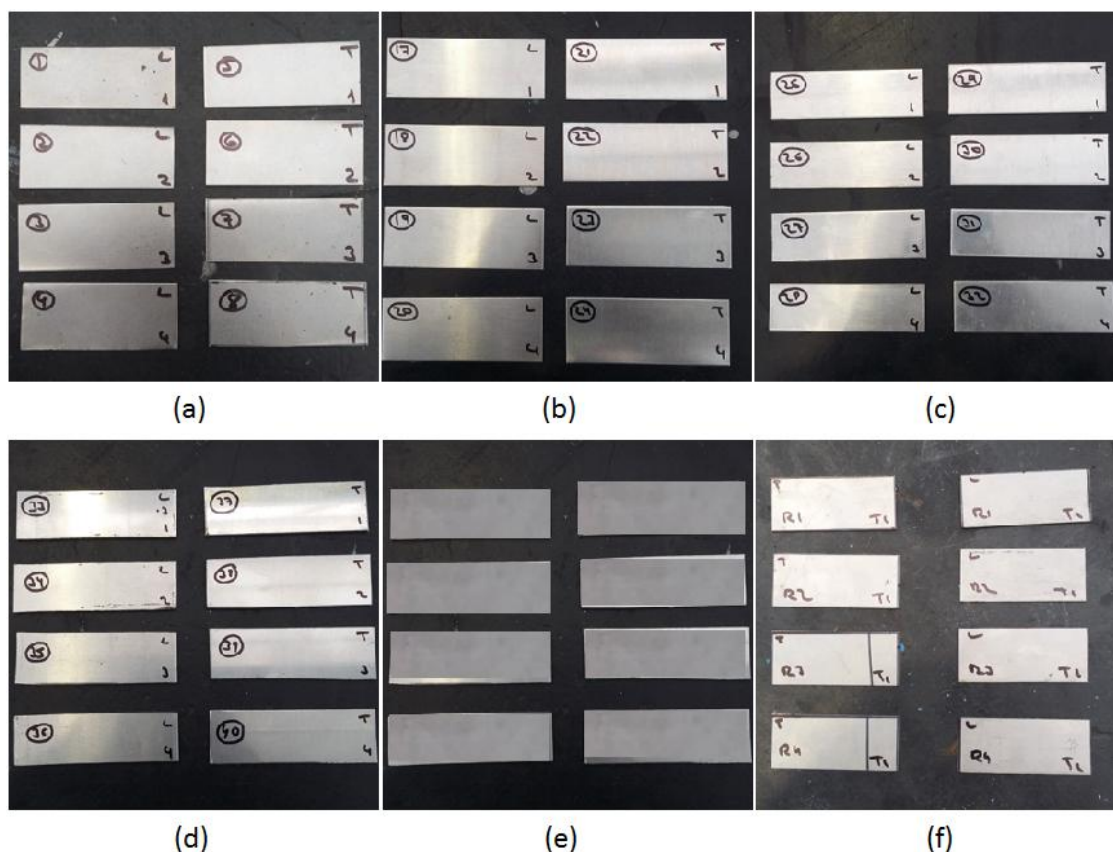


Figura 3.3.4. Probetas preparadas con la designación numérica.

- (a) Probetas de la 1 a la 8 (dimensiones 25 x 60 mm)
- (b) Probetas de la 17 a la 24 (dimensiones 30 x 80 mm)
- (c) Probetas de la 25 a la 32 (dimensiones 25 x 80mm)
- (d) Probetas de la 33 a la 40 (dimensiones 25 x 80 mm)
- (e) Probetas de la 41 a la 48 (dimensiones 30 x 80)
- (f) Probetas de la 49 a la 56 (dimensiones 25 x 60 mm)

Las más fáciles de cortar en la cizalla fueron las de acero, aluminio 2024 y titanio por los espesores que tenían. Aquí cabe citar la dificultad para cortar el acero en el sentido de la laminación (Figura 3.3.5), pudiendo permitir su corte en pequeñas longitudes y con un trabajo de desbardado posterior bastante importante en magnitud y tiempo.



Figura 3.3.5. Desgarre que sucede cuando se corta el acero con la cizalla en sentido L.

Pero sin duda, la dificultad mayor se presenta cuando las planchas miden 2,5 m de largo, por 1 m de ancho, rondando espesores de 3 mm, como sucedía para el caso de los aluminios 1050 y 7075. En un principio se intentó cortar las probetas con la sierra de cinta, pero el

manejo de las magnitudes de la plancha se hacía imposible de controlar. Como segunda opción se optó por la utilización de la caladora para el corte de longitudes de gran calibre. Una vez que el tamaño de las preformas se hacían más manejables, se pasaba a utilizar la sierra de cinta. Como se puede observar también en la Figura 3.3.6, las planchas se cubrían con cinta de carroceros para no ser dañadas tras el paso de la maquinaria. En la misma figura también se pueden ver las rebabas que produce el proceso de corte.



Figura 3.3.6. Probeta de aluminio sacada tras el corte en la sierra de cinta.

En la Tabla 3.3.1 se ve que se cortan 8 probetas de cada material, 4 en dirección de la laminación (L) y otras 4 transversalmente (T), variable que se podrá analizar posteriormente cómo influye en los resultados. Se fabricarán 4, una para cada punzón, aunque dos de ellas quedarán siempre inutilizadas por la falta del punzón de radio 1 mm, como se comentaba en epígrafe 3.1. También se observa que se fabricarán probetas, de algunos de los materiales, que serán sometidas a procesos previos al doblado de pretensado y de recocido para alivio de tensiones. La fabricación de estas probetas se explicará en el epígrafe 4.4 y epígrafe 4.5.

Por último apuntar que se fabricaron más de una probeta por caso para analizar distintos resultados de un mismo experimento, aunque la exposición finalmente sea sólo de un experimento por caso, cuando proceda.

3.4 Variables experimentales

Aunque las variables experimentales han sido mencionadas en los epígrafes anteriores, a continuación se comentan de forma detallada a modo de orientación sobre las conclusiones que se pretenden obtener con este trabajo.

- *Propiedades del material.*

El material va a ser la primera variable con la que se va a experimentar, y probablemente será la que proporcione el rango más amplio. La tensión de fluencia y el módulo de la elasticidad de cada material que se trabajará, serán principalmente las propiedades que hagan que los resultados del fenómeno de la recuperación elástica varíen tanto de unos metales a otros. Cuanto mayor sea la tensión de fluencia, mayor deformación elástica

admitirá el material y por tanto mayor será la recuperación que éste experimente. Inversamente, cuanto mayor sea el módulo de la elasticidad, más rígido será el material y menor será el fenómeno de *springback*.

- *Espesor de la chapa.*

La principal influencia del espesor se podrá ver cuando de un mismo material con las mismas propiedades se ensayen dos espesores diferentes como en el caso del Aluminio 2024. Se puede predecir que a mayor espesor menor será la recuperación, tal y como ocurre con el módulo de la elasticidad, aunque se necesite mayor fuerza de deformación. En función de la dureza del material y del espesor de la chapa también existirán unos límites de radios de doblado mínimo, por debajo del cual puede verse el material agrietado.

- *Radio de doblado.*

Como ya se viene diciendo, se trabajará finalmente con tres radios de doblado muy diferentes entre sí, para así poder ver mejor la influencia de esta variable. Al contrario que el espesor, al radio de doblado le ocurre como a la tensión de fluencia: a mayor radio menor será la deformación plástica experimentada por el material, y por tanto la recuperación será mayor. Otro parámetro muy importante en el ensayo de doblado será el radio dividido entre el espesor de la chapa, lo que marcará los límites de la posición de la fibra neutra, dotando de veracidad a la ecuación que se trabaja en teoría (2.6.10) cuando el cociente sea mayor o igual a cuatro, pudiendo suponer entonces que la línea neutra se encuentra en la mitad de espesor.

- *Dirección de la laminación.*

Con esta variable se analizará la influencia de la dirección de la fibra respecto a la dirección de doblado. Se trabajarán dos direcciones: longitudinal a la laminación y transversalmente a ella. Aunque ya se verá que la influencia de esta variable si se compara con otras, es más pequeña. Por la posición de la fibra, la dirección longitudinal siempre tenderá a recuperar más que la transversal, aunque pueden existir otros factores más influyentes en el comportamiento de la chapa que distorsionarán esta medida.

- *Endurecimiento por pretensado previo.*

Otra variable con la que se trabajará será la influencia de someter la chapa a un proceso de tracción previo al doblado, que dote al material de un endurecimiento por deformación. Cuando éste sea sometido posteriormente al proceso de doblado, la resistencia a la fluencia plástica se verá aumentada y por tanto al ángulo de recuperación debe ser mayor.

- *Tratamiento de alivio de tensiones.*

En un principio, cuando se planteó este proyecto, no se contaba con esta variable experimental, pero se requirió de ella durante la realización de los ensayos.

3.5 Realización de los ensayos

Una vez definidas las variables experimentales se fueron realizando los diferentes ensayos en los diferentes punzones. Un ejemplo del realizado en el punzón de 12,5 mm en probetas de aluminio 2024T3 de 1,2 mm de espesor, se muestra en la Figura 3.5.1



Figura 3.5.1. Secuencia fotográfica del ensayo de doblado

Una vez dobladas las probetas se procede a medir el ángulo de recuperación en el proyector de perfiles (Figura 3.5.2). Además se observan los posibles fallos o roturas que tengan lugar en las probetas.

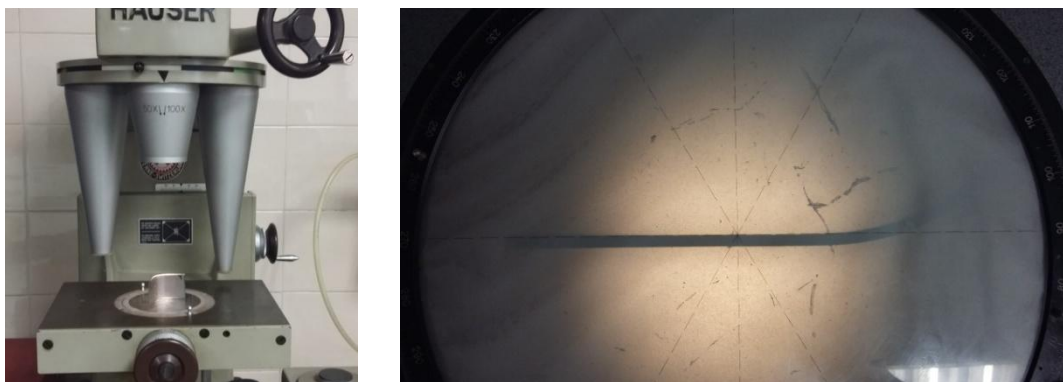


Figura 3.5.2. Medición de ángulos en el proyector de perfiles.

Los valores experimentales obtenidos se comparan con los valores teóricos esperados; medidos, calculados y detallados en el Capítulo 4.

Capítulo 4.

Análisis de resultados

*La ingeniería
es el hilo que termina
en el horizonte.
María Guillén*

4.1 Análisis teórico del doblado en V

En este apartado se retomarán todos los puntos de la teoría del Capítulo 2 que se van a analizar, haciendo una valoración teórica de los parámetros como predicción de los resultados experimentales que se deberían obtener en el siguiente subepígrafe.

4.1.1 Análisis general del ángulo de recuperación

Retomando la ecuación (2.6.11) en forma de recta $y = m \cdot x$:

$$-\frac{\Delta\theta}{\theta} = 3 \left(\frac{S}{E'} \right) \left(\frac{\rho}{t} \right) \quad (4.1.1)$$

Se representarán los distintos $-\Delta\theta/\theta$ frente a los ρ/t para cada caso de S y $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ de los distintos materiales a experimentar, siendo:

$\Delta\theta$ es el valor del ángulo de recuperación elástica

θ el valor del ángulo de la matriz que se desea obtener y que en este proyecto será igual para todos los casos, 90°

S es la tensión de fluencia característica del material, que se aproxima al valor del límite elástico (valor de la tensión que deja una deformación en la probeta del 0,2%), y en condiciones de deformación plana (multiplicado por $2/\sqrt{3}$)

E' el módulo elástico del material en condiciones de deformación plana $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$

ν el coeficiente de Poisson del material

t el espesor de la chapa

ρ es el radio de curvatura de la línea neutra, $\rho = R + \lambda t$, siendo R el valor del radio para los tres punzones (2,75, 5,5 y 12,5 mm) y para λ se tomará siempre el valor de 0,5 para que se cumpla la condición de la ecuación, tal y como se explica en el capítulo 2, aunque habrá casos en los que realmente no se cumplan y serán comentados en los resultados.

Las unidades que se tomarán para introducir en las ecuaciones serán siempre milímetros (mm), megapascuales (MPa) y grados ($^{\circ}$). Se representarán los valores de $\Delta\theta/\theta$ que impone la ecuación con las características del material, para los distintos valores de ρ que se obtienen de los tres radios de los punzones, y se unirán así, formando la recta que impone la ecuación 4.1.1. Para los mismos tres valores de ρ , en la misma gráfica, se representarán los $\Delta\theta/\theta$ experimentales, siendo esta vez el valor de $\Delta\theta$ el que se obtiene de realizar el ensayo de doblado en V y que es medido en el proyector de perfiles, como el ángulo de recuperación elástica sufrido realmente por el material. Se ajustarán los puntos resultantes de los ensayos a través de una recta por el método de mínimos cuadrados. Es entonces cuando se pasará a hacer un análisis crítico de las similitudes y discrepancias de la teoría y la práctica de la recuperación elástica del proceso de doblado en V.

Partiendo de todos los valores de las características de los distintos materiales que serán necesarias para la aplicación de la ecuación 4.1.1, y que se resumen en la Tabla 4.1.1, se realiza entonces un código en el programa de *Matlab* (Anexo I) para facilitar la realización de todos los cálculos necesarios.

A continuación se muestra en la Tabla 4.1.1 todos los resultados obtenidos al ejecutar el programa para los distintos tipos de materiales.

Tabla 4.1.1. Resultados de la ejecución del programa para todos los materiales.

MATERIALES	$\Delta\theta$	$\Delta\theta/\theta$	ρ/t
Acero DC01	1,0533	0,0117	3,9375
	1,9728	0,0219	7,3750
	4,3134	0,0479	16,1250
Al 2024 (t = 1,2 mm)	3,3360	0,0371	2,7917
	6,0746	0,0675	5,0833
	13,0454	0,1449	10,9167
Al 2024 (t = 1,6 mm)	2,6514	0,0295	2,2187
	4,7053	0,0523	3,9375
	9,9334	0,1104	8,3125
Aluminio 1050	0,5989	0,0067	1,4167
	0,9865	0,0110	2,3333
	1,9729	0,0219	4,6667
Aluminio 7075	2,6760	0,0297	1,3730
	4,3775	0,0486	2,2460
	8,7086	0,0968	4,4683
Titanio 6Al-4V	13,6493	0,1517	6,0000
	26,1611	0,2907	11,5000
	58,0095	0,6445	25,5000

4.1.2 Análisis de la recuperación elástica positiva

Aunque este trabajo principalmente se centra en medir los ángulos de recuperación, también será de interés hacer un poco de análisis, sobre algunas muestras, de los radios de plegado que quedan marcados en las chapas que se experimentan. Para ello se emplea la ecuación 2.6.10.

Para los cálculos se sigue utilizando el programa de *Matlab*, pero esta vez solo se mostrarán algunos ejemplos de algunos materiales (acero, aluminio 2024 de espesor 1,2 mm y titanio). El código del programa se muestra en el Anexo I.

En la Tabla 4.1.2 se recogen los resultados de todos los radios finales obtenidos de los cálculos ejecutados, que serán analizados en el siguiente epígrafe conjuntamente con los resultados experimentales.

Tabla 4.1.2. Resultados obtenidos de ejecutar el programa de recuperación positiva.

MATERIALES	$R_i = 2,75 \text{ mm}$	$R_i = 5,5 \text{ mm}$	$R_i = 12,5 \text{ mm}$
	$R_f [\text{mm}]$		
Acero DC01	2,7770	5,6091	13,0778
Al 2024 ($t = 1,2 \text{ mm}$)	2,8338	5,8455	14,4351
Titanio 6Al-4V	3,1511	7,3601	27,8437

4.2 Análisis de resultados experimentales según ángulo de doblado

Una vez realizados los ensayos se pasa a representar en tablas y gráficas los resultados obtenidos para cada material. Las probetas están identificadas con el número asignado en la Tabla 4.2.1 según el ensayo a realizar.

4.2.1 Acero DC01

En la Tabla 4.2.1 se muestran los ángulos de recuperación medidos y calculados, en la Tabla 4.2.2 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos y experimentales para los ρ/t que han sido calculados y en la Figura 4.2.1 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.1. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el acero.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
1	-	-	-	AC08L0R1
2	-3° 27'	-3,4500	1,0533	AC08L0R2
	-3° 40'	-3,6667		
	-3° 56'	-3,9333		
3	1° 12'	1,2000	1,9728	AC08L0R3
	1° 40'	1,6667		
	2° 30'	2,5000		
4	6° 50'	6,8333	4,3134	AC08L0R4
	8° 42'	8,7000		
	7° 29'	7,4833		
5	-	-	-	AC08T0R1
6	-2° 40'	-2,6667	1,0533	AC08T0R2
	-2° 40'	-2,6667		
	-3° 50'	-3,8333		
7	2° 45'	2,7500	1,9728	AC08T0R3
	1° 39'	1,6500		
	1° 0'	1,0000		
8	9° 35'	9,5833	4,3134	AC08T0R4
	8° 0'	8,0000		
	5° 51'	5,8500		

Tabla 4.2.2. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el acero.

Acero DC01			
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$	$\Delta\theta/\theta$	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico		
3,9375	0,0117	-	-
7,375	0,0219	-	-
16,125	0,0479	-	-
	Práctico L		
3,9375	-0,0383	-0,0407	-0,0437
7,375	0,0133	0,0185	0,0278
16,125	0,0759	0,0967	0,0865
	Práctico T		
3,9375	-0,0296	-0,0296	-0,0426
7,375	0,0306	0,0183	0,0111
16,125	0,1065	0,0889	0,065

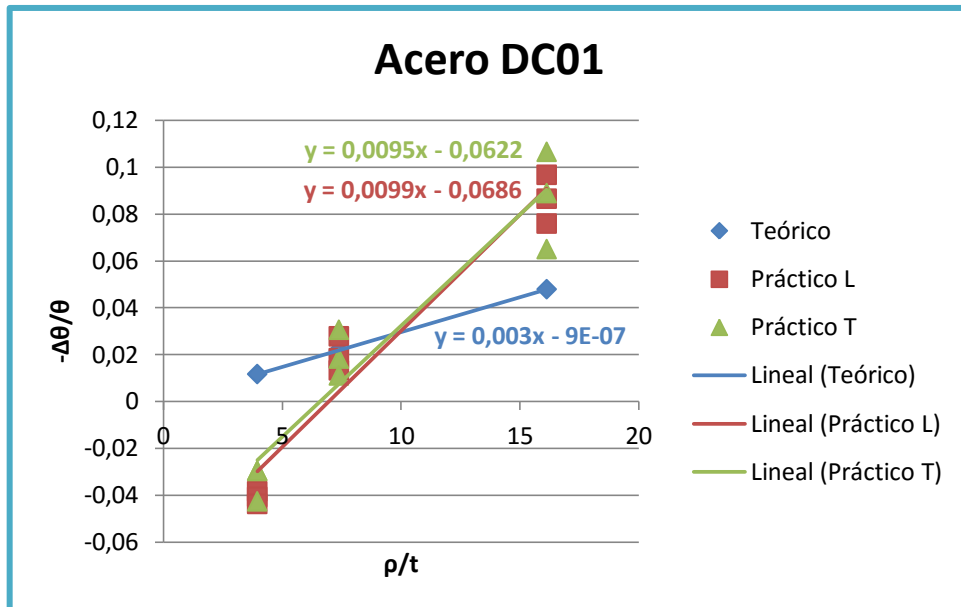


Figura 4.2.1. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el acero.

Lo primero a destacar de este material, que salta a la vista nada más ver la Tabla 4.2.1, son los valores negativos del ángulo de recuperación que toma el acero para los ensayos de radio menor, 2,75 mm. Esto quiere decir, que tal y como se muestra en la Figura 4.2.2 el ángulo final de doblado es más pequeño que el de la matriz.

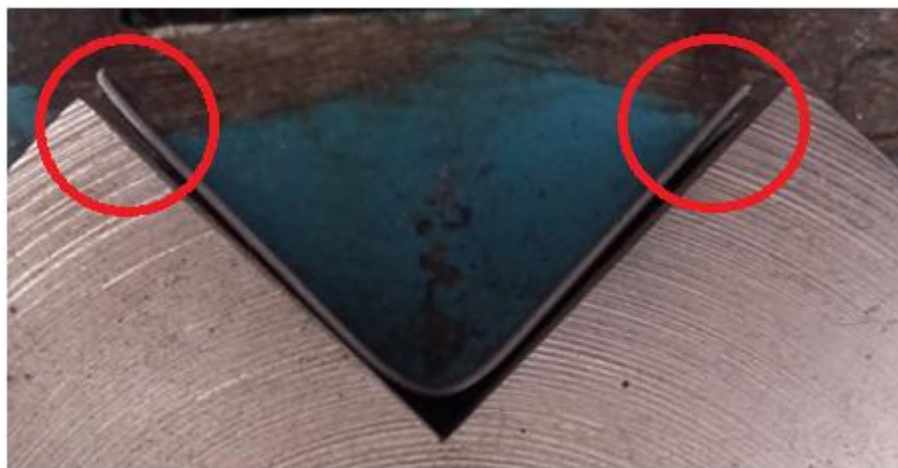


Figura 4.2.2. Chapa de acero plegada en el punzón de radio 2,75 mm.

Para el ensayo de radio 5,5 mm el metal casi que toma la forma de la matriz, teniendo un ángulo de recuperación entre uno y dos grados (Figura 4.2.3.a). En cambio, para el ensayo de radio mayor, 12,5 mm, ya se puede apreciar de forma más pronunciada el fenómeno de la recuperación elástica (Figura 4.2.3.b).



Figura 4.2.3. Chapas de acero plegadas:

- (a) con el punzón de radio 5,5 mm
- (b) con el punzón de radio 12,5 mm.

Se observa también que a pesar de realizar ensayos en las mismas condiciones, los ángulos de recuperación medidos para los mismos llegan a variar entre uno y dos grados, alcanzando diferencias incluso de hasta cuatro grados para los ensayos que se efectúan con el radio de mayor magnitud. Se realizan tres ensayos para cada radio (2,75 mm, 5,5 mm y 12,5 mm) y para cada dirección de laminación (L y T), cogiendo tres muestras del material en diferentes localizaciones de la plancha, comprobando así la diferencia de los resultados entre los ensayos. Destacar aquí que la última columna de la Tabla 4.2.2 hace referencia a los ensayos de las muestras tomadas en el centro de la probeta, donde el acero estaba dotado de mayor planitud. Se observa que es en dicha columna la única que se cumple que las recuperaciones en la dirección L son mayores que en la T.

En la Figura 4.2.1 se ve que la recta experimental no guarda ningún sentido con la teórica, sin pasar por el origen y sin guardar relación en el valor de las pendientes. En la misma figura y en la Tabla 4.2.1, comparando los ángulos de recuperación teóricos y experimentales se aprecia como las diferencias menores se encuentran para los ensayos que se realizan con el punzón de radio 5,5 mm.

Por último, comentar que debido a la recuperación que sufre el material en sentido inverso para las probetas 2 y 6, se tomarán medidas alternativas en el epígrafe 4.5 donde se le aplicará al material un tratamiento de recocido de alivio de tensiones, ya que como se comentará en las conclusiones, este acero podría venir dotado de tensiones residuales del proceso de laminación previo al que ha sido sometido para su fabricación, lo que estaría manipulando positivamente la medida del ángulo de recuperación que sufre el material en el ensayo de radio 5,5 mm.

4.2.2 Aluminio 2024T3 (t = 1,2 mm)

En la Tabla 4.2.3 se muestran los ángulos de recuperación medidos y calculados, en la Tabla 4.2.4 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos y experimentales para los ρ/t que han sido calculados y en la Figura 4.2.4 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.2.4.

Tabla 4.2.3. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el aluminio 2024 (1,2).

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
17	-	-	-	AL12L0R1
18	11° 33'	11,5500	3,3360	AL12L0R2
19	13° 25'	13,4167	6,0746	AL12L0R3
20	21° 16'	21,2667	13,0454	AL12L0R4
21	-	-	-	AL12T0R1
22	8° 55'	8,9167	3,3360	AL12T0R2
23	12° 60'	13,0000	6,0746	AL12T0R3
24	21° 21'	21,3500	13,0454	AL12T0R4

Tabla 4.2.4. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 2024 (1,2).

Aluminio 2024 (1,2)	
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico
2,7917	0,0371
5,0833	0,0675
10,9167	0,1449
	Práctico L
2,7917	0,1283
5,0833	0,1491
10,9167	0,2363
	Práctico T
2,7917	0,0991
5,0833	0,1444
10,9167	0,2372

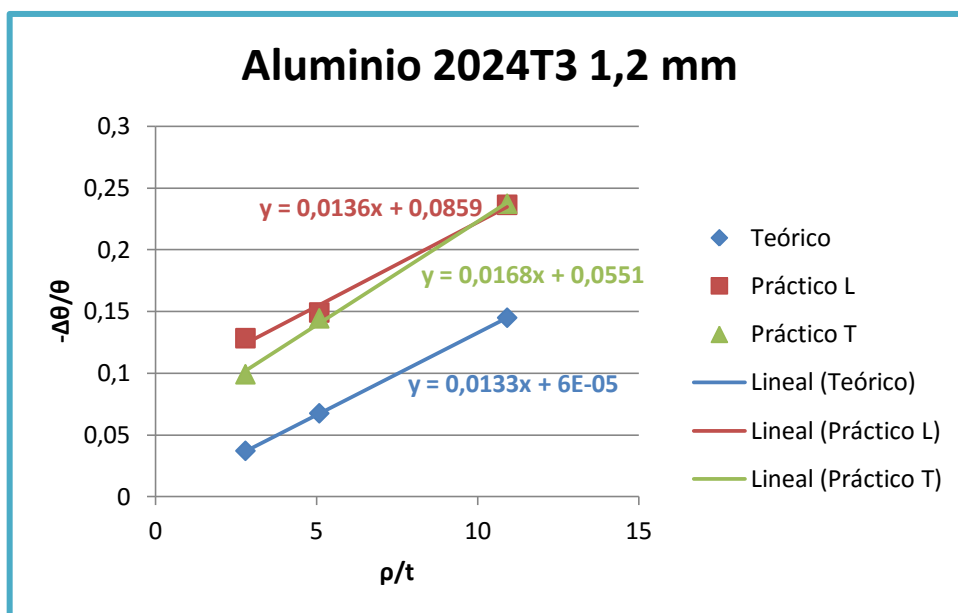


Figura 4.2.4. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 2024 (1,2).

En este material puede verse perfectamente cómo se cumple que la dirección L adhiere más ángulo de recuperación que cuando se realiza el proceso de doblado en dirección T. Observando la Figura 4.2.4, casi que se podría decir también que este incremento cobra más importancia cuando el ensayo se realiza con radios más pequeños. Por otra parte, puede verse claramente cómo el ángulo de recuperación experimental es mayor que el esperado para todos los casos, y si se pone la vista en los ensayos T se podría decir más claramente que esta diferencia se ve incrementada a la vez que se aumenta la magnitud del radio de doblado.

Comparando las ecuaciones de las rectas (Figura 4.2.4) se ve que las pendientes son muy parecidas, sobretodo la práctica en dirección L y la teórica, pudiendo apreciarse perfectamente que estas difieren en una constante.

Se especifica que aunque sólo aparece la medida de un ensayo por experimento, en realidad han sido dos experimentos por ensayo los realizados, pero debido a que la diferencia era de pocos minutos, sólo se ha escogido uno para ser representado.

4.2.3 Aluminio 2024T3 (t = 1,6 mm)

En la Tabla 4.2.5 se muestran los ángulos de recuperación medidos y calculados, en la Tabla 4.2.6 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos y experimentales para los ρ/t que han sido calculados y en la Figura 4.2.5 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.2.6.

Tabla 4.2.5. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el aluminio 2024 (1,6).

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
25	-	-	-	AL16L0R1
26	10° 7'	10,1167	2,6514	AL16L0R2
27	12° 19'	12,3167	4,7053	AL16L0R3
28	17° 54'	17,9000	9,9334	AL16L0R4
29	-	-	-	AL16T0R1
30	9° 54'	9,9000	2,6514	AL16T0R2
31	10° 15'	10,2500	4,7053	AL16T0R3
32	17° 18'	17,3000	9,9334	AL16T0R4

Tabla 4.2.6. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 2024 (1,6).

Aluminio 2024 (1,6)	
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico
2,2187	0,0295
3,9375	0,0523
8,3125	0,11040
	Práctico L
2,2187	0,1124
3,9375	0,1369
8,3125	0,1989
	Práctico T
2,2187	0,11
3,9375	0,1139
8,3125	0,1922

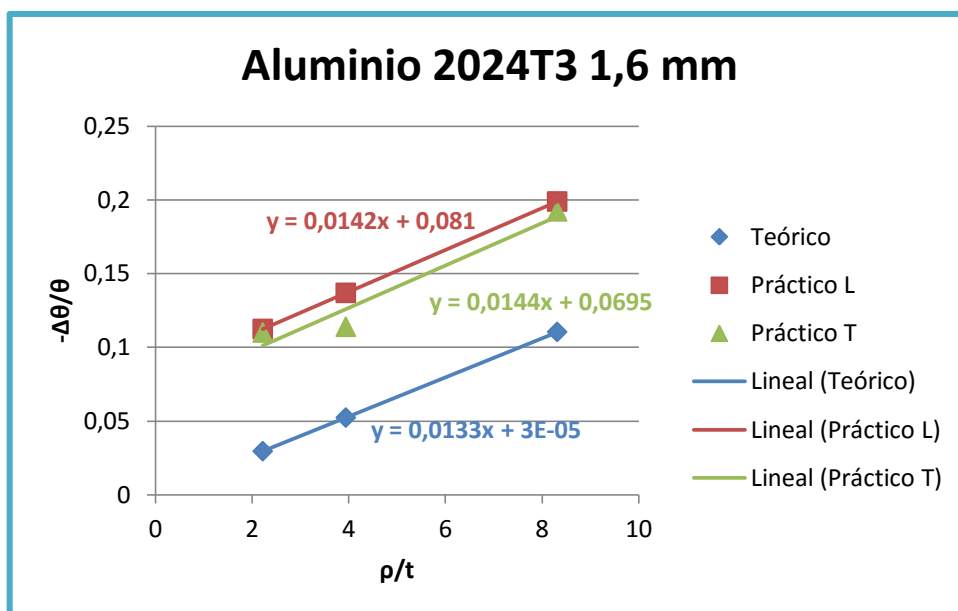


Figura 4.2.5. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 2024 (1,6).

Pasando a comentar ahora el mismo material que el anterior pero con un espesor mayor, se espera que el ángulo de recuperación en este caso sea algo menor. El primer problema a destacar es que si en el caso del espesor menor para el ensayo de radio menor, el material se encontraba en el límite de poder considerar que la línea neutra se encontraba en la mitad del espesor, para este caso se ve claramente en la Figura 4.2.5 que para el ensayo de radio 2,75 mm el material no se encuentra en condiciones de suponer $\lambda = 1/2$, lo que podría distorsionar un poco la veracidad de la ecuación de la recta. Un ejemplo claro de ello se ve en que la regla de que la recuperación elástica es menor para este caso siempre se cumple para los dos radios mayores y no para el radio menor. Lo cierto es que si se obviara el ensayo de radio menor y se unieran los puntos de los otros dos ensayos formando la recta de la ecuación, la grafica sería cualitativamente igual a la obtenida para el caso anterior del mismo material de espesor menor. El análisis que se obtendrían de un caso y de otro serían prácticamente igual.

Sabiendo como varía λ según el ratio R_i/t (ecuación 2.6.2), se podría tomar $\lambda = 0,42$ en este caso para el radio menor, lo que daría igual a un $\rho/t = 2,1388$ en lugar de 2,2187. Realizando el cambio se obtiene la Figura 2.4.6, donde se observa que las diferencias son mínimas si se representa el cambio.

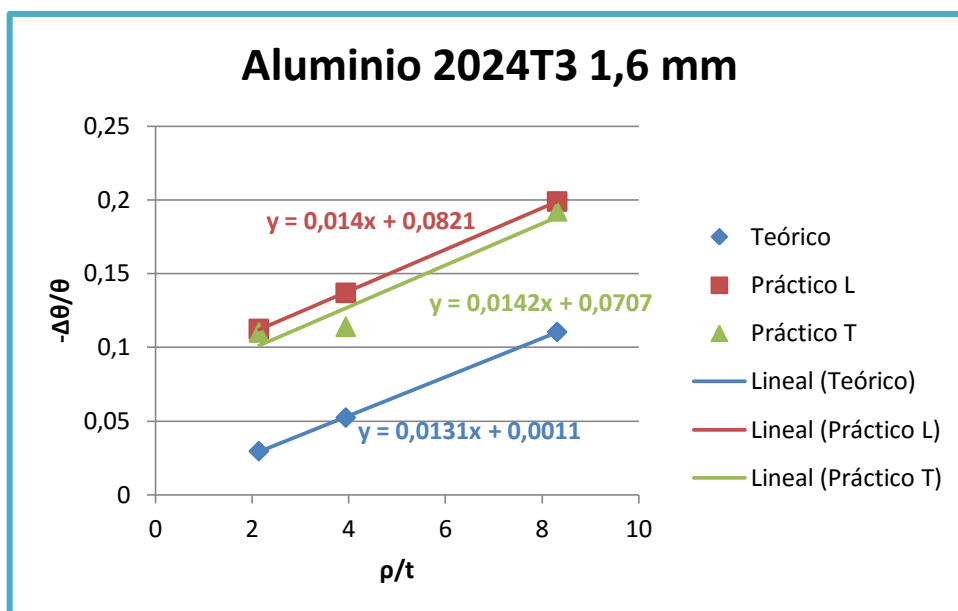


Figura 4.2.6. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 2024 (1,6), teniendo en cuenta la variación de λ .

4.2.4 Aluminio 1050H14

En la Tabla 4.2.7 se muestran los ángulos de recuperación medidos y calculados, en la Tabla 4.2.8 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos y experimentales para los ρ/t que han sido calculados y en la Figura 4.2.7 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.2.8.

Tabla 4.2.7. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el aluminio 1050.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
33	-	-	-	AL30L0R1
34	1° 45'	1,7500	0,5989	AL30L0R2
35	2° 4'	2,0667	0,9865	AL30L0R1
36	4° 0'	4,0000	1,9729	AL30L0R4
37	-	-	-	AL30T0R1
38	1° 0'	1,0000	0,5989	AL30T0R2
39	2° 34'	2,5667	0,9865	AL30T0R3
40	4° 20'	4,3333	1,9729	AL30T0R4

Tabla 4.2.8. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 1050.

Aluminio 1050	
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico
1,4167	0,0067
2,3333	0,0110
4,6667	0,0219
	Práctico L
1,4167	0,0194
2,3333	0,023
4,6667	0,0444
	Práctico T
1,4167	0,0111
2,3333	0,0285
4,6667	0,0481

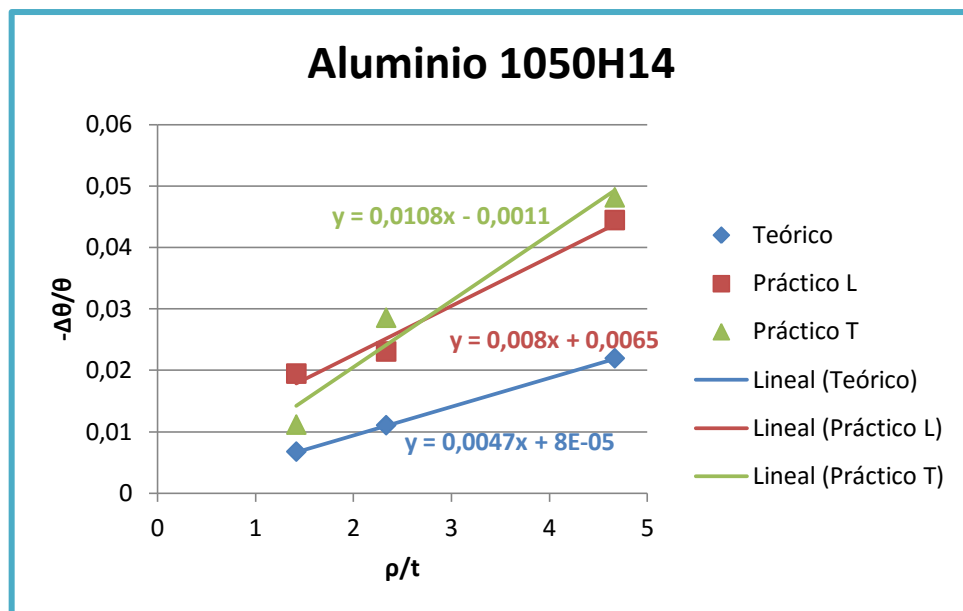


Figura 4.2.7. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 1050.

Para este caso, lo primero a comentar es la alta ductilidad de este material, siendo la primera prueba de ello los ángulos de recuperación tan pequeños que se esperan obtener a pesar del espesor tan grande que lo caracteriza. Quizás el análisis cualitativo de la gráfica induzca a errores que realmente no son de la índole a la que llevan a pensar. Si se observa cuantitativamente se puede apreciar por una parte, que los rangos en los que se mueve este aluminio no son muy grandes, y es por ello por lo que la diferencia en la gráfica se ve mayor

de lo que realmente es. Esta vez no se cumple que la recuperación en la dirección L es mayor que en la T, pero la diferencia en este caso son de minutos, errores que podrían venir inducidos incluso por la toma de medidas. Por otra parte se vuelve a tener el mismo problema que en el caso anterior, donde la condición para que λ sea $\frac{1}{2}$ no se cumple. Lo que si se cumpliría en este caso, si se obviara el resultado del punzón de radio menor, sería que la recta prácticamente pasaría por el origen, aunque la pendiente creciera paralelamente a T. A continuación se muestra en la Figura 4.2.8 cómo queda la chapa de aluminio en la matriz tras ser descargada en el punzón menor de radio 2,75 mm.

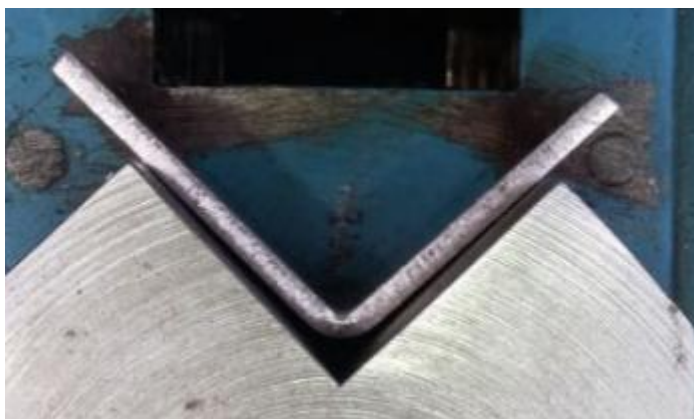


Figura 4.2.8. chapa de aluminio 1050 en la matriz, tras ser descargada en el punzón menor de radio 2,75 mm.

Algo muy curioso es lo que ocurre cuando este material se procesa en las direcciones L y T. En la Figura 4.2.8 se observa como el radio que marca la probeta de la derecha es limpio y sin fallos superficiales, es la probeta T doblada. En cambio, si se pone la vista ahora en la de la izquierda, probeta L doblada, se puede observar cómo se marcan las fibras en la superficie empezándose a crear una especie de piel de naranja.



Figura 4.2.9. A la izquierda la probeta de aluminio 1050 L doblada, a la derecha de la dirección T.

Viendo esto entra la curiosidad de ver los radios mínimos de doblado para este material, que se muestran en la tabla de la Figura 4.2.10, donde se puede comprobar que el límite lo marca el radio de 1 mm, por lo que hubiera sido de gran interés poderlo haber experimentado.

RADIOS DE PLEGADO							
Estado	0,4<e<0,8 mm.	0,8<e<1,6 mm	1,6<e<3,2 mm.	3,2<e<4,8 mm.	4,8<e<6 mm.	6<e<10 mm.	10<e<12 mm.
0-H111	0	0	0	0,5	1	1	1,5
H14-H24	0	0,5	1	1	2	2,5	2,5
H18	1	2	3	3,5			
Multiplicar el coeficiente por el espesor (e) de la chapa							

Figura 4.2.10. Radios mínimos de plegado del aluminio 1050 según el espesor. (ALACER MAS, s/f)

4.2.5 Aluminio 7075T6

En la Tabla 4.2.9 se muestran los ángulos de recuperación medidos y calculados, en la Tabla 4.2.10 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos y experimentales para los ρ/t que han sido calculados y en la Figura 4.2.11 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.2.10.

Tabla 4.2.9. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el aluminio 7075.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
41	-	-	-	AL32L0R1
42	ROMPE	ROMPE	2,6760	AL32L0R2
43	ROMPE	ROMPE	4,3775	AL32L0R3
44	15° 26'	15,4333	8,7086	AL32L0R4
45	-	-	-	AL32T0R1
46	ROMPE	ROMPE	2,6760	AL32T0R2
47	ROMPE	ROMPE	4,3775	AL32T0R3
48	15° 0'	15,0000	8,7086	AL32T0R4

Tabla 4.2.10. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 7075.

Aluminio 7075	
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico
1,373	0,0297
2,246	0,0486
4,4683	0,0968

Tabla 4.2.10. Cont. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 7075.

Aluminio 7075	
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$
	Práctico L
1,373	ROMPE
2,246	ROMPE
4,4683	0,1715
	Práctico T
1,373	ROMPE
2,246	ROMPE
4,4683	0,1667

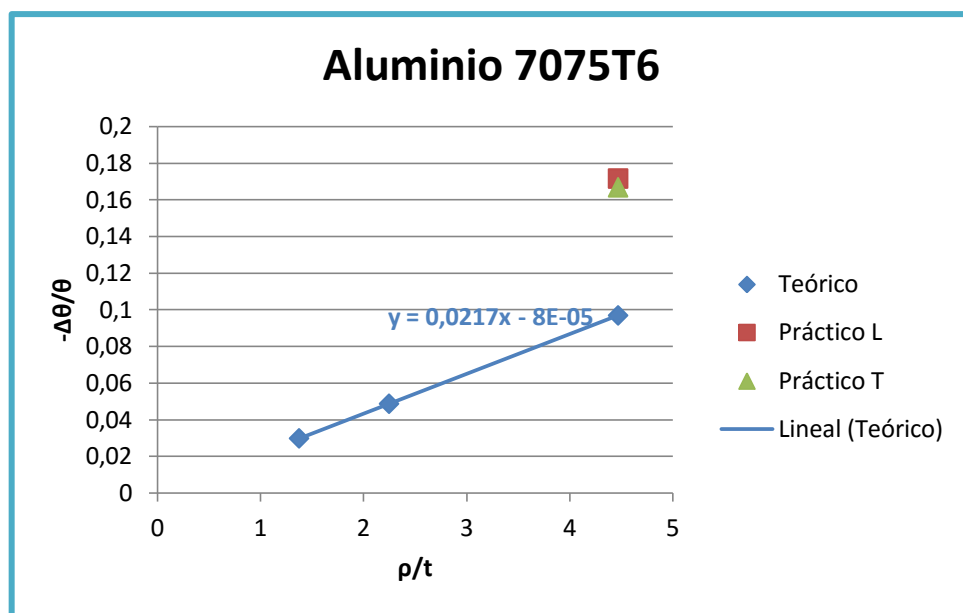


Figura 4.2.11. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el aluminio 7075.

Un caso muy diferente es lo que ocurre con este material, que a pesar de tener más o menos el mismo espesor del material anterior, resultados muy dispares a los anteriores son los que se obtienen del ensayo, debido a las propiedades tan diferentes que ambos presentan. Por la dureza de este material, lo primero que se ha de estudiar son los radios de plegado mínimos, que la ficha técnica del material expuesta en el epígrafe XX materiales facilita y que se muestra a continuación en la Figura 4.2.12.

RADIOS DE PLEGADO							
Estado	0,4<e<0,8 mm.	0,8<e<1,6 mm	1,6<e<3,2 mm.	3,2<e<4,8 mm.	4,8<e<6 mm.	6<e<10 mm.	10<e<12 mm.
0	0	1	1	1,5	2,5	3,5	
T6	4,5	5,5	6,5	7	8		

Figura 4.2.12. Radios de plegado mínimo para el Aluminio 7075. (ALACERMAS, s/f)

Viendo los resultados de la tabla correspondiente a la figura 4.2.12, se puede predecir claramente lo que ocurrirá en los ensayos con los dos radios menores, a pesar de lo que dice la ecuación, que no contempla esta restricción del radio mínimo. Y efectivamente una rotura clara, como la que se muestra en la Figura 2.4.13, es la que se obtiene de estos cuatro ensayos, sobreviviendo sólo el ensayo de radio mayor. Para este último ensayo, el valor del ángulo de recuperación experimental casi que dobla en magnitud al calculado, algo que viene pasando en todos los materiales ensayados para radio 12,5 mm. En este caso también se cumple que el *springback* en la dirección L es mayor que en la T, pero con una diferencia mínima de medio grado, como suele pasar para radios mayores.

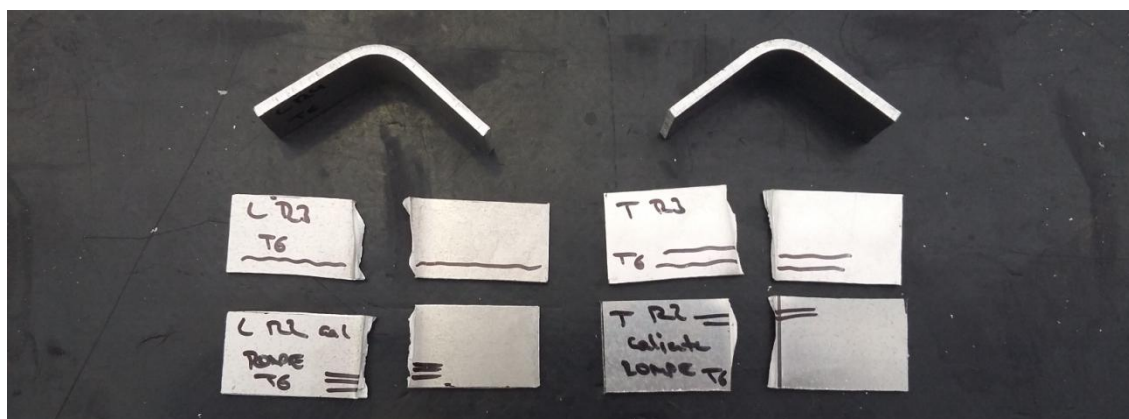


Figura 2.4.13. Resultado de las probetas de aluminio 7075 tras realizar los ensayos de doblado.

4.2.6 Titanio 6Al-4V

En la Tabla 4.2.11 se muestran los ángulos de recuperación medidos y calculados, en la Tabla 4.2.12 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos y experimentales para los ρ/t que han sido calculados y en la Figura 4.2.14 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.2.12.

Tabla 4.2.11. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el titanio.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
49	-	-	-	TI05L0R1
50	21° 40'	21,6667	13,6493	TI05L0R2
51	40° 30'	40,5000	26,1611	TI05L0R3
52	61° 11'	61,1833	58,0095	TI05L0R4

Tabla 4.2.11. Cont. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el titanio.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
53	-	-	-	TI05TOR1
54	21° 16'	21,2667	13,6493	TI05TOR2
55	42° 10'	42,1667	26,1611	TI05TOR3
56	60° 0'	60,0000	58,0095	TI05TOR4

Tabla 4.2.12. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el titanio.

Titanio	
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico
6	0,1517
11,5	0,2907
25,5	0,6445
	Práctico L
6	0,2407
11,5	0,45
25,5	0,6798
	Práctico T
6	0,2362
11,5	0,4658
25,5	0,6667

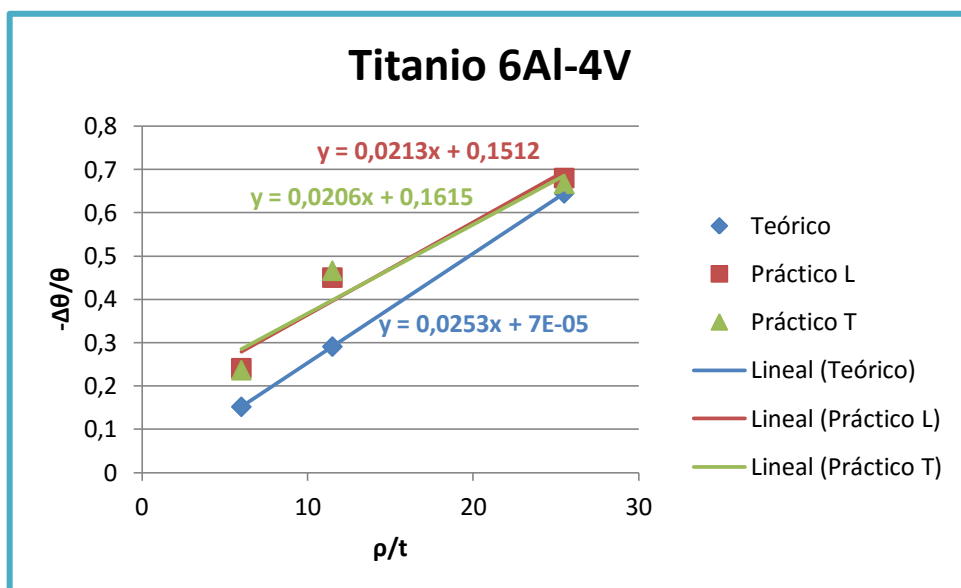


Figura 4.2.14. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el titanio.

Sin duda, lo que más llama la atención de este proyecto son los resultados que se obtienen con este material de tan peculiar índole y de elevado coste. Para ello, nada más hay que ver cómo quedan las probetas tras los ensayos en la Figura 4.2.15, donde ya se ve perfectamente grandes diferencias con los materiales experimentados anteriormente.



Figura 4.2.15. Probetas de titanio tras el proceso de doblado.

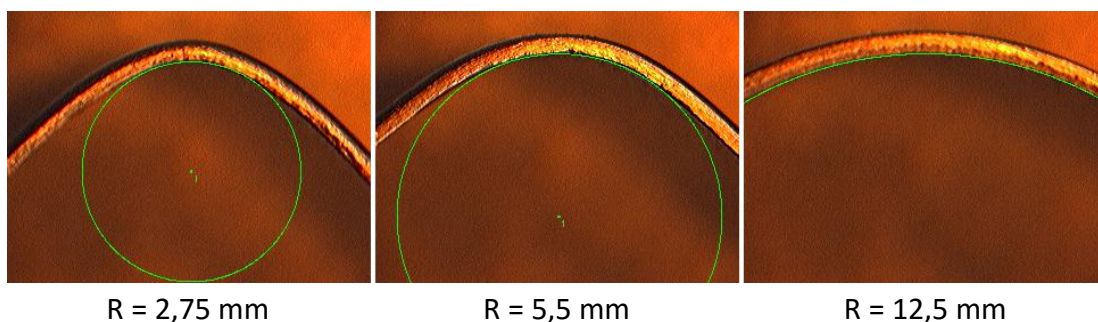
De este material se pueden observar distintos detalles que llaman la atención del análisis de resultados de la gráfica y tablas. Lo primero a comentar es la diferencia tan pequeña que existe entre las direcciones del ensayo L y T, esto será debido a los ángulos de recuperación tan grande que experimenta. Lo segundo que llama la atención es que el incremento del ángulo de recuperación que existe en lo experimental respecto a lo teórico, se mantiene constante para todos los radios, es por ello por la que la pendiente calculada y medida son muy semejantes

4.3 Análisis de resultados experimentales según radio de doblado

En este caso solo se analizarán las probetas 6, 7, 8, 22, 23, 24, 54, 55, y 56 (según la tabla 4.3.1). Una vez dobladas se miden los radios finales en el microscopio óptico como muestra la Tabla 4.3.1

Tabla 4.3.1. Radios de doblado de las probetas según material y radio inicial (del punzón).

ACERO

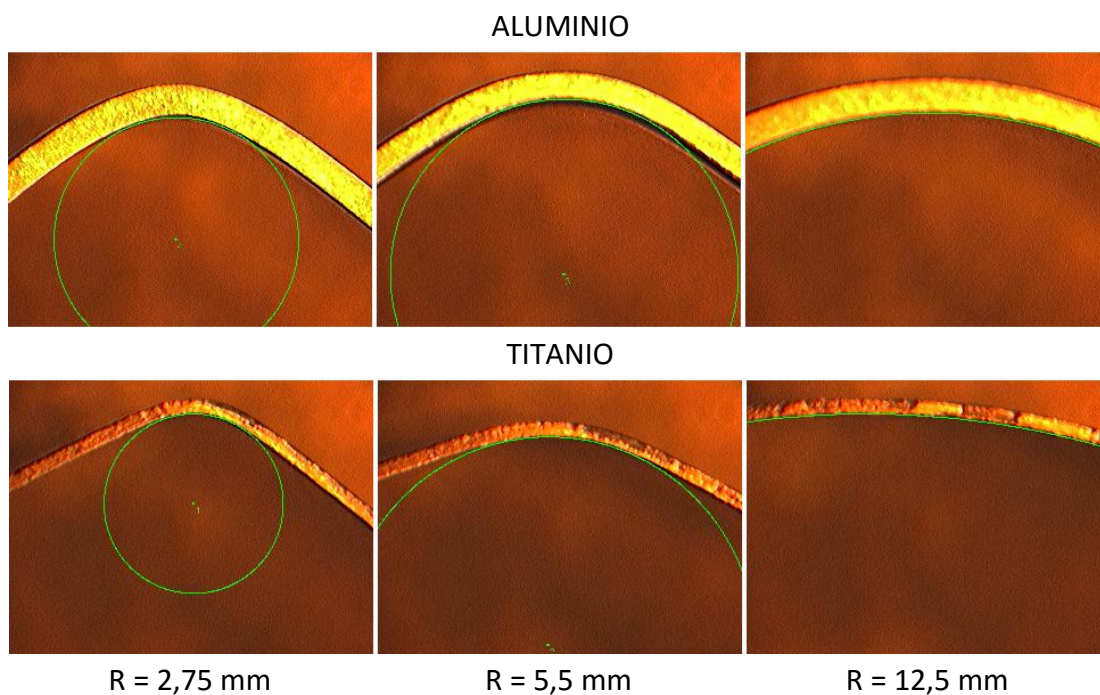


R = 2,75 mm

R = 5,5 mm

R = 12,5 mm

Tabla 4.3.1. Cont. Radios de doblado de las probetas según material y radio inicial (del punzón).



La Tabla 4.3.2 muestra los resultados obtenidos de las mediciones y los valores teóricos calculados.

Tabla 4.3.2. Radios obtenidos en las probetas (radios finales R_f) en función de los radios del punzón (radios iniciales R_i)

MATERIALES	R _i = 2,75 mm		R _i = 5,5 mm		R _i = 12,5 mm	
	R _f [mm]					
	CALCULADO	MEDIDO	CALCULADO	MEDIDO	CALCULADO	MEDIDO
Acero DC01	2,78	3,71	5,61	5,65	13,08	12,49
Al 2024 (t = 1,2 mm)	2,83	4,14	5,85	5,89	14,44	15,00
Titanio 6Al-4V	3,15	3,14	7,36	7,15	27,84	29,57

Haciendo un análisis de la Tabla 4.3.2 se puede ver como los radios teóricos se ajustan perfectamente a los experimentales llegando incluso hasta alcanzar la décima, para los ensayos realizados con el punzón de radio 5,5 mm en el acero y en el aluminio y para el ensayo de radio 2,75 mm en el titanio. Las diferencias mayores se encuentran para los ensayos de radio 2,75 mm en el aluminio y para el de radio 12,5 mm en el titanio, sin alcanzar en ninguno de los casos una diferencia mayor de 2 mm.

4.4 Análisis de resultados experimentales en probetas pretensadas

Una de las variables objeto de estudio era comprobar cómo influía en la recuperación elástica el hecho de que la probeta tuviera una deformación inicial, particularmente un pretensado obtenido mediante ensayo de tracción. Con ello se vería aumentado el coeficiente de endurecimiento n y el límite elástico aparente del material, aumentando así la resistencia a la fluencia plástica del metal. Este ensayo se aplicará especialmente para el Acero DC01, aunque también se verá algún ejemplo para el Aluminio 2024T3 en los dos espesores (1,2 mm y 1,6 mm).

4.4.1 Preparación de las probetas para el ensayo de tracción

Como ya se sabe, las probetas para el ensayo de tracción están estandarizadas, pero lo cierto es que dichas probetas están diseñadas para que el material se traccione hasta romper, hecho que no ocurrirá en el ensayo de pretensado que se pretende hacer. Recordando que las dimensiones de las probetas de acero eran de 25 x 60 mm, se podrían hacer probetas de 120 mm de largo, sumándole las longitudes de agarre de las mordazas. Todo ello daría igual a probetas rectangulares de 220 x 30 mm (Figura 4.4.1) en direcciones longitudinales a la laminación y transversalmente a ella.

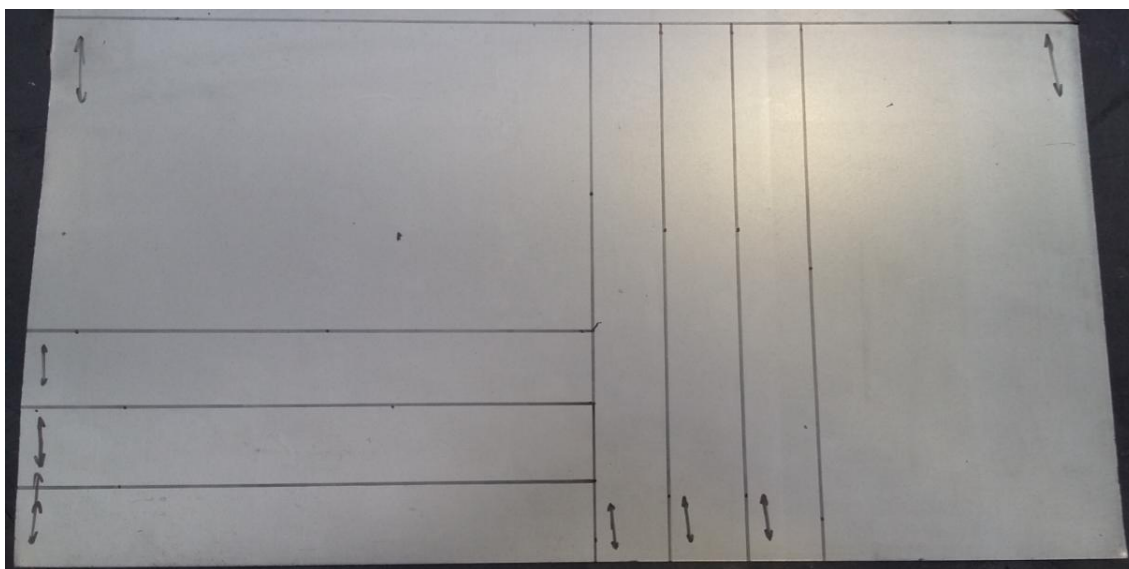


Figura 4.4.1. Probetas de acero marcadas para el ensayo de tracción.

Para poder medir bien las deformaciones que sufre la probeta, en distintos puntos de ella se opta por utilizar el método de inscripción de circunferencias, mediante un sello de caucho, una almohadilla y tinta negra, Figura 4.4.2.

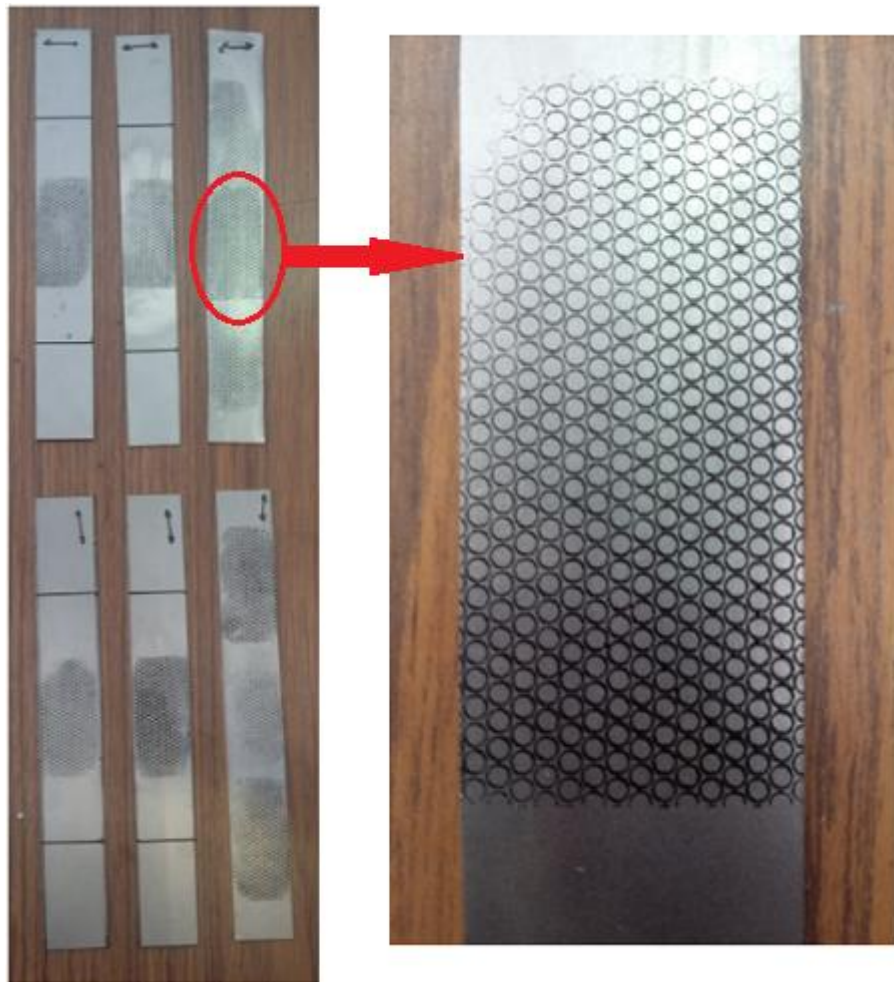


Figura 4.4.2. Probetas de acero marcadas con circunferencias para la medida de deformaciones.

A continuación se muestran la preparación de las probetas para el aluminio. Se escogen de las mismas que se tenían preparadas para el ensayo de doblado, de dimensiones 30 x 80 mm para las chapas de espesor 1,2 mm y de 25 x 80 mm para las de 1,6 mm. Se dejan 20 mm de longitud por cada lado para la sujeción de las mordazas, quedando 40 mm como longitud de ensayo en todas las probetas, Figura 4.4.3.

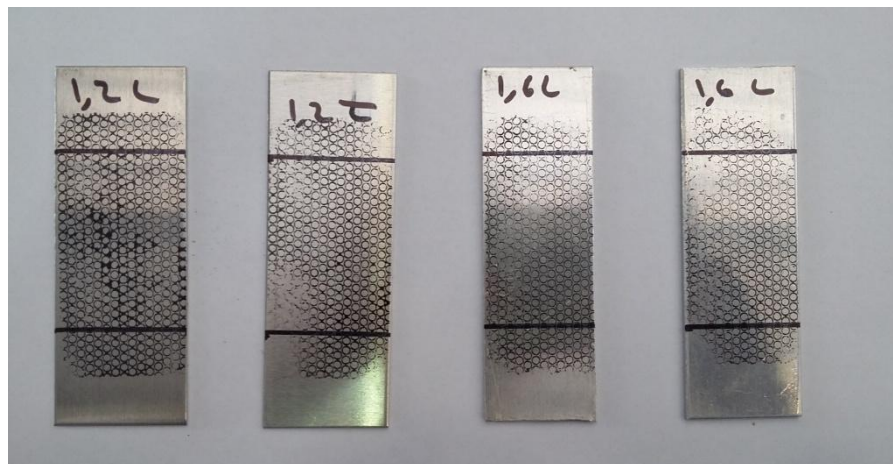


Figura 4.4.3, Probetas de aluminio preparadas para en ensayo de pretensado.

4.4.2 Ensayo de pretensado

Una vez se tienen listas las probetas, se disponen para hacer el ensayo, Figura 4.4.3.



Figura 4.4.3. Probeta de acero preparada para aplicar el pretensado.

Para controlar el ensayo de tracción, la máquina es conectada a un ordenador que muestra un programa de control tal y como ilustra la Figura 4.4.4.

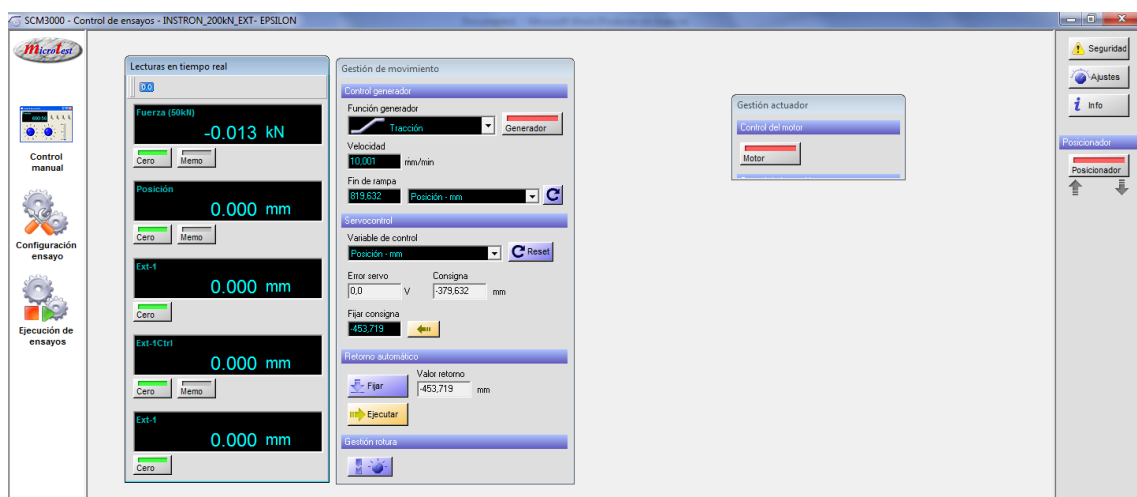


Figura 4.4.4. Programa de control de la máquina de tracción.

Imponiendo la velocidad y controlando la posición, se efectuará el ensayo. Teniendo en cuenta que se decide aplicar una deformación del 25 %, habrá que inducir un incremento de posición en la separación de mordazas de 30 mm, tal y como se muestra en la Ecuación 4.4.1.

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{150 - 120}{120} = \frac{30}{120} = 0,25 \quad (4.4.1)$$

La velocidad a la que se lleva a cabo el proceso es de 10 mm/min y las fuerzas máximas aplicadas rondan los 7 kN.

Análogamente para el aluminio, debido a que se pretende aplicar el mismo porcentaje de deformación que a las probetas de acero, realizando los cálculos, se obtiene que hay que aplicar un incremento de posición entre las mordazas de 10 mm. La velocidad que se impone en este caso es de 5 mm/min y las fuerzas máximas rondan los 16 kN para las probetas de espesor 1,2 mm, y los 20 kN para las de espesor 1,6 mm.

A continuación se muestran las situaciones finales de las probetas tras el ensayo de pretensado, para el acero (Figura 4.4.5 y Figura 4.4.6) y del aluminio (Figura 4.4.7)



Figura 4.4.5. Situación final de la probeta de acero traccionada.

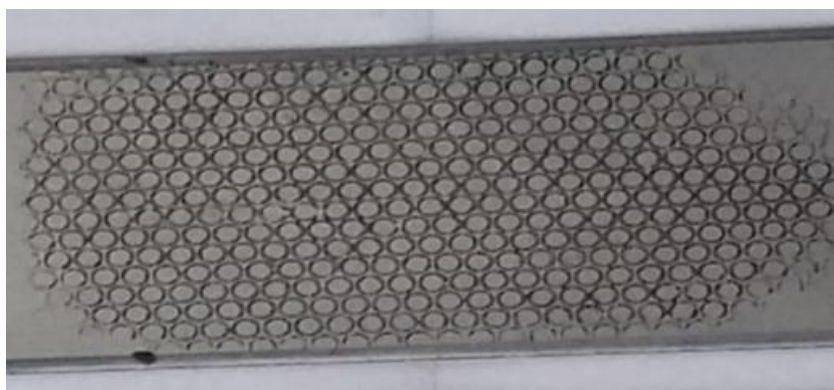


Figura 4.4.6. Situación final de la probeta de acero ampliada en la zona central.

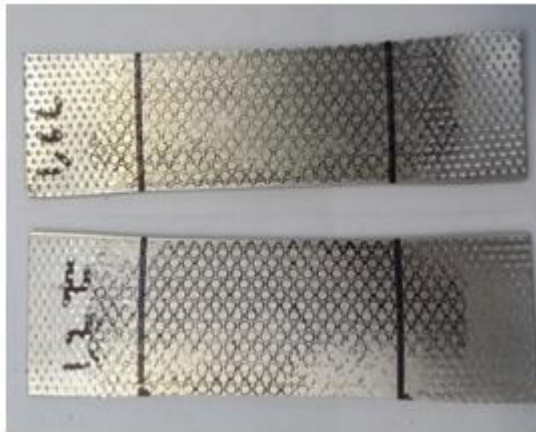


Figura 4.4.7. Situación final de las probetas de aluminio traccionadas.

4.4.3 Medición de las deformaciones

Una vez se extrae la probeta de acero del ensayo, se lleva al microscopio óptico (Figura 4.4.8) para que sean anotadas las medidas de los diámetros de las circunferencias, en el centro y en el extremo de la probeta (Tabla 4.4.1).

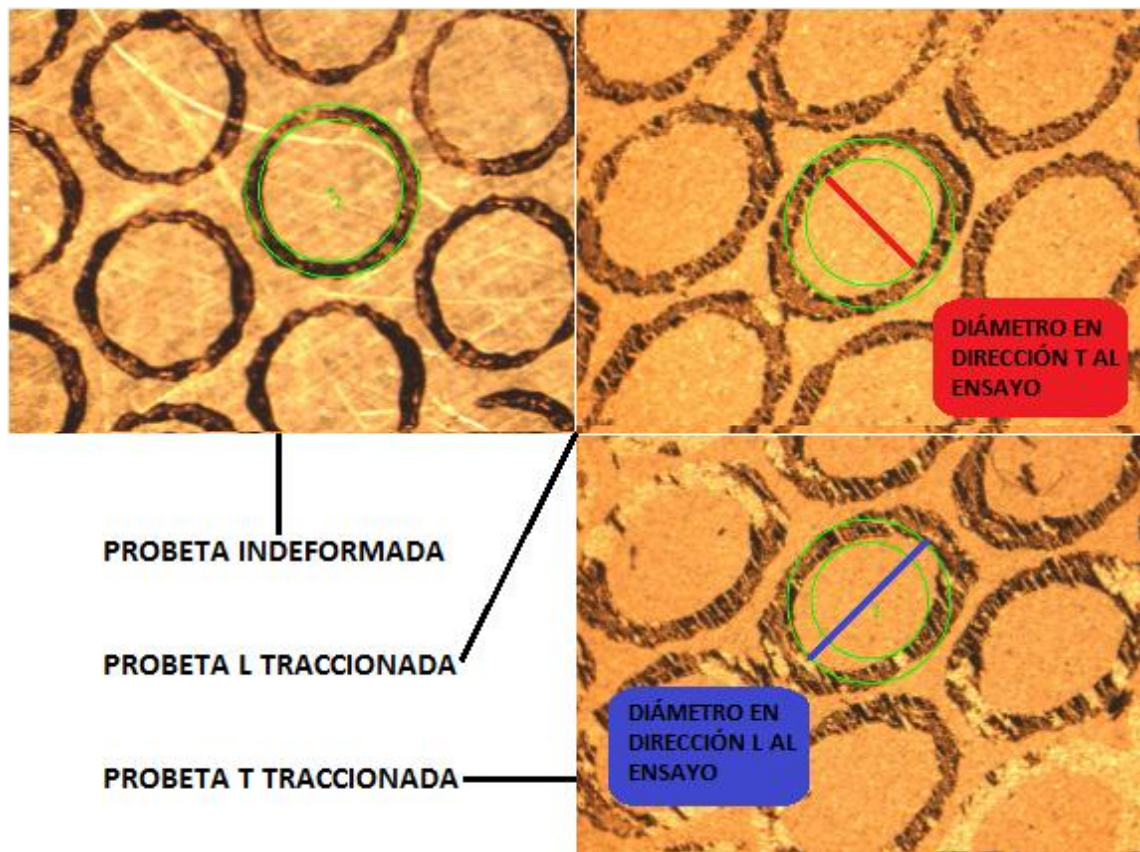


Figura 4.4.8. Circunferencias ampliadas en el microscopio óptico para medir.

Tabla 4.4.1. Diámetros anotados como datos tomados del microscopio óptico.

DIMENSIONES MEDIDAS	PROBETA SIN TRACCIONAR	PROBETA L TRACCIONADA	PROBETA T TRACCIONADA
Espesor, t [mm]	0,79	0,735	0,735
Diámetro en dirección L al ensayo (centro de la probeta), [mm]	1,65	1,94	1,88
Diámetro en dirección T al ensayo (centro de la probeta), [mm]	1,65	1,46	1,35
Diámetro en dirección L al ensayo (extremo de la probeta), [mm]	1,65	1,98	1,89
Diámetro en dirección T al ensayo (extremo de la probeta), [mm]	1,65	1,48	1,39

Seguidamente se hacen los cálculos de las deformaciones, de manera análoga a la ecuación 4.4.1. y se anotan en la Tabla 4.4.2.

Tabla 4.4.2. Deformaciones de la probeta de acero del ensayo de tracción.

DIMENSIONES MEDIDAS	DEFORMACIONES (%)	
	PROBETA L	PROBETA T
Espesor	-7	-7
Dirección L ensayo (centro)	17,6	13,9
Dirección. T ensayo (centro)	-11,5	-18,8
Dirección L ensayo (extremo)	20	14,5
Dirección T ensayo (extremo)	-10,3	-15,8

De la Tabla 4.4.2 se puede extraer como información la anisotropía del material. Dividiendo la deformación, en cualquiera de las direcciones, entre la deformación en el espesor, se obtendría así la anisotropía del material en dicha dirección. La Tabla 4.4.3. muestra todos los resultados posibles de la anisotropía en el centro de la probeta, viéndose la no homogeneidad del material.

Tabla 4.4.3. Valores de r en distintas direcciones, anisotropía del material.

r	PROBETA L	PROBETA T
Anisotropía en L	2,51	2,69
Anisotropía en T	1,64	1,99

Para el aluminio se obtienen las deformaciones que se muestran en la Tabla 4.4.4.

Tabla 4.4.4. Deformaciones de las probetas de aluminio del ensayo de tracción.

DIMENSIONES MEDIDAS	DEFORMACIONES (%)			
	PROBETA 12L	PROBETA 12T	PROBETA 16L	PROBETA 16T
Espesor	-5,9	-5,9	-5,7	-5,7
Dir. L al ensayo	7,9	2,4	9,1	3,6
Dir. T al ensayo	-13,3	-11,5	-12,7	-9,7

Se puede observar en la Tabla 4.4.4 que las deformaciones obtenidas son mucho menores que las deseadas. Una de las causas a la que se puede deber tal hecho podría ser el desgarre que sufren las probetas de aluminio en las mordazas, tal y como se puede ver en la Figura 4.4.9.



Figura 4.4.9. Desgarre que sufren la probeta de aluminio.

4.4.4 Preparación de las probetas para el ensayo de doblado

Una vez se tienen tomadas todas las medidas del ensayo de tracción, se cortan las probetas y se preparan para ser sometidas posteriormente al ensayo de doblado en V, tanto las de acero (Figura 4.4.10), como las de aluminio (Figura 4.4.11).

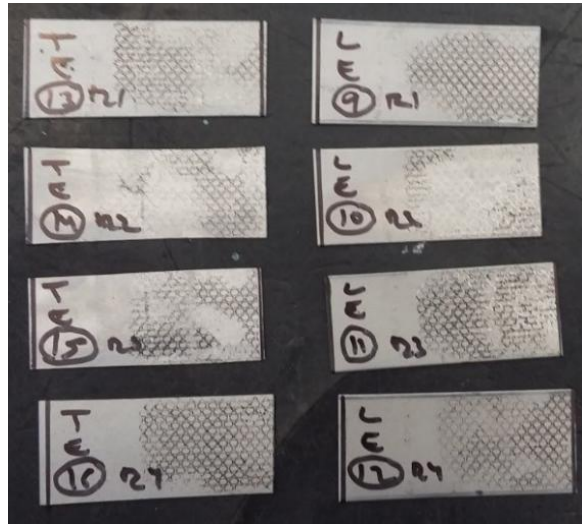


Figura 4.4.10. Probetas de acero preparadas para el ensayo de doblado (numeración de la 9 a la 16 según la tabla 3.3.1).

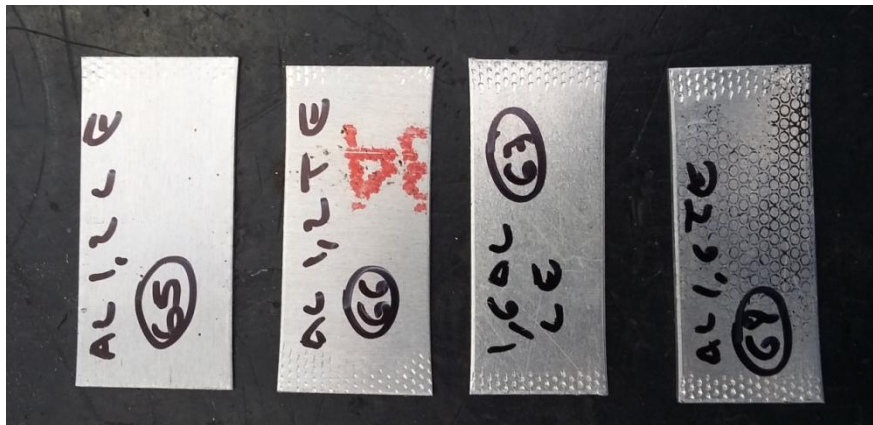


Figura 4.4.11. Probetas de aluminio preparadas para el ensayo de doblado (numeración de la 65 a la 68 según la tabla 3.3.1).

4.4.5 Realización de los ensayos de doblado y análisis de resultados

Se realizan los ensayos y se toman las medidas del ángulo de recuperación, $\Delta\theta$, en el proyector de perfiles, tal y como se ha hecho en todos los ensayos de doblados explicados en el epígrafe 4.2. En la Tabla 4.4.5 se muestran los ángulos de recuperación medidos para acero traccionado, en la Tabla 4.4.6 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos sin pretensado y experimentales traccionados para los ρ/t que han sido calculados en el subepígrafe 4.2.1 y en la Figura 4.4.12 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.4.6.

Tabla 4.4.5. Valores del ángulo de recuperación del acero en las probetas traccionadas.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL $\Delta\theta$ [° ']	EXPERIMENTAL $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
9	-	-	AC08L1R1
10	0° 9'	0,1500	AC08L1R2
11	6° 55'	6,9167	AC08L1R3
12	11° 45'	11,7500	AC08L1R4
13	-	-	AC08T1R1
14	0° 33'	0,5500	AC08T1R2
15	7° 58'	7,9667	AC08T1R3
16	13° 0'	13,0000	AC08T1R4

Tabla 4.4.6. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos sin pretensado y experimentales traccionados para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el acero traccionado.

AC ENDURECIDO	
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico sin endurecer
3,9375	0,0117
7,375	0,0219
16,125	0,0479
	Práctico L endurecido
3,9375	0,0017
7,375	0,0769
16,125	0,1306
	Práctico T endurecido
3,9375	0,0061
7,375	0,0885
16,125	0,1444

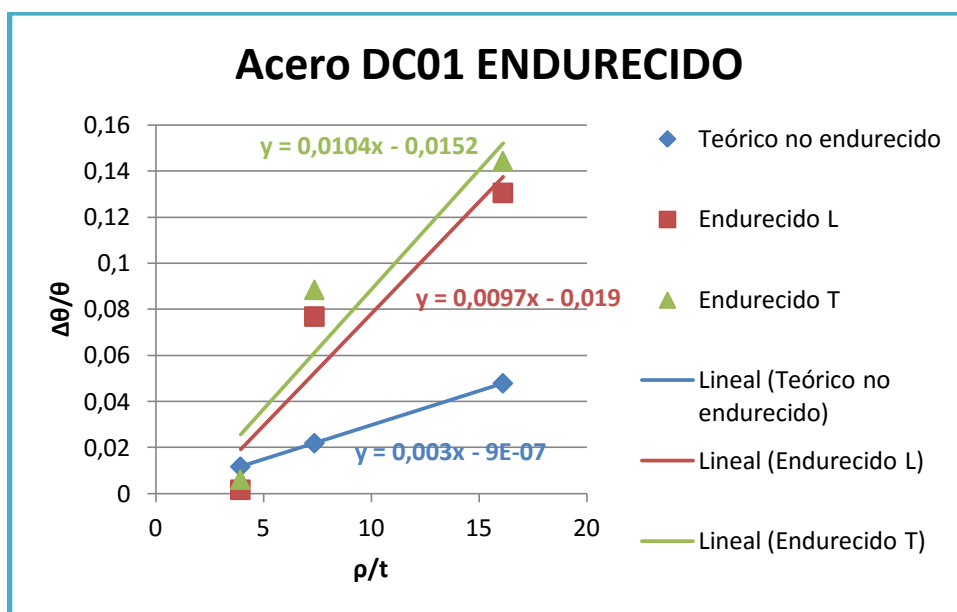


Figura 4.2.12. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos sin pretensado y experimentales traccionados para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el acero traccionado.

En la gráfica se observa como el ángulo de recuperación aumenta en las probetas cuando se les aplica un proceso de pretensado previo al doblado, triplicándose la pendiente de la recta. También se observa cómo la dirección T experimenta mayor ángulo que la L y se observa como con el pretensado desaparecen los valores negativos de recuperación elástica (Figura 4.2.13)



Figura 4.4.13 Proceso de doblado del acero endurecido en el punzón de radio 2,75 mm.

Para el aluminio se experimentan las cuatro probetas, doblándolas en el punzón de radio 2,75 mm. Los resultados son claros y se muestran en la Tabla 4.4.7 y en la Figura 4.4.14, el material se agrieta, llegando a romper.

Tabla 4.4.7. Valores del ángulo de recuperación del aluminio en las probetas traccionadas.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL $\Delta\theta$ [° ']	EXPERIMENTAL $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
65	ROMPE	ROMPE	AL12L1R2
66	ROMPE	ROMPE	AL12T1R2
67	ROMPE	ROMPE	AL16L1R2
68	ROMPE	ROMPE	AL16T1R2

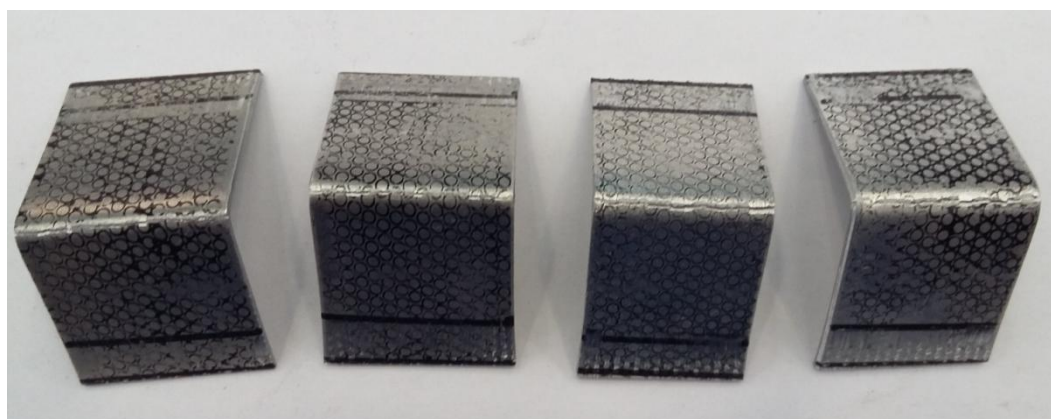


Figura 4.4.14. Probetas de aluminio pretensadas y sometidas al proceso de doblado en V en el punzón de radio 2,75 mm.

4.5 Análisis de resultados experimentales en probetas recocidas

Se decide aplicar un tratamiento de recocido para alivio de tensiones en probetas del acero DC01 para analizar si los resultados de la recuperación elástica negativa pudieran deberse a tensiones residuales internas que trajera el material del proceso de laminación previo al que ha sido sometido.

Lo primero que se hace para llevar a cabo este proceso es buscar en libros y personas especializadas en la materia de materiales sobre las condiciones a la que se debe llevar este tratamiento térmico. Según (American Society for Metals, 1998) se sabe que el proceso debe realizarse a menos de 700°C para que el material no recritalice, y consejo de expertos en la materia dicen no sobrepasar los 600°C, lo que ya se considera una temperatura elevada para este tipo de proceso y material. Por todo ello, se decide llevar a cabo el proceso a 550°C, manteniéndose dicha temperatura durante una hora. El segundo problema que se plantea son los rampas de calentamiento y enfriamiento, algo que se deja en el aire ya que finalmente con el equipamiento que se dispone, se hace imposible de controlar. Realmente no es un proceso de recocido minucioso, pero dará una idea general de cómo afecta.

A continuación, en la Figura 4.5.1 se muestra cómo se disponen las probetas para ser sometidas al tratamiento. Partiendo de un trozo de material cerámico, con ayuda de una pequeña sierra, se hacen endiduras para colocar en posición vertical todas las probetas de acero a las que se le aplicará el tratamiento. Una vez colocadas las probetas, son introducidas en un cazo de colada, para posteriormente introducirlas en el horno de fundición, Figura 4.5.2.



Figura 4.5.1. Probetas de acero dispuestas para someterlas al tratamiento de recocido.



Figura 4.5.2. Proceso de recocido de las probetas de acero.

Pasada la hora de tratamiento, las probetas se dejan enfriar en el horno lentamente hasta el día siguiente. Se obtienen entonces las probetas recocidas de la Figura 4.5.3.

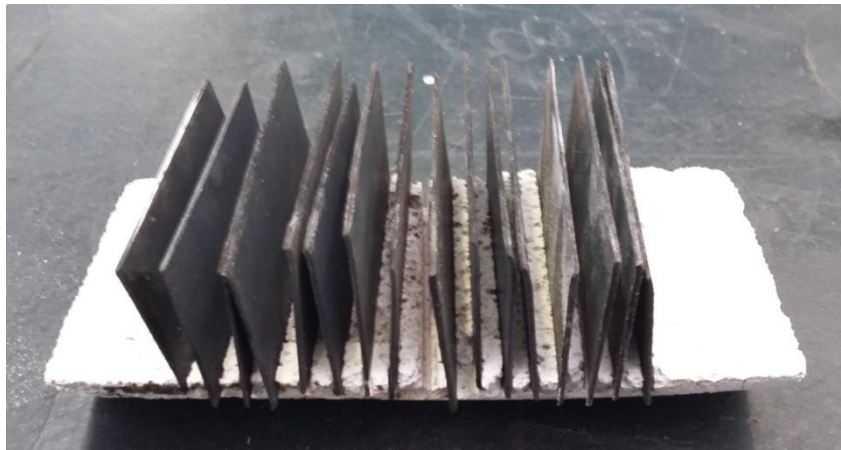


Figura 4.5.3. Probetas de acero tras el tratamiento de recocido.

Se distinguen con una marca las probetas en dirección L y T y se preparan para ser sometidas posteriormente al proceso de doblado en V, Figura 4.5.4.

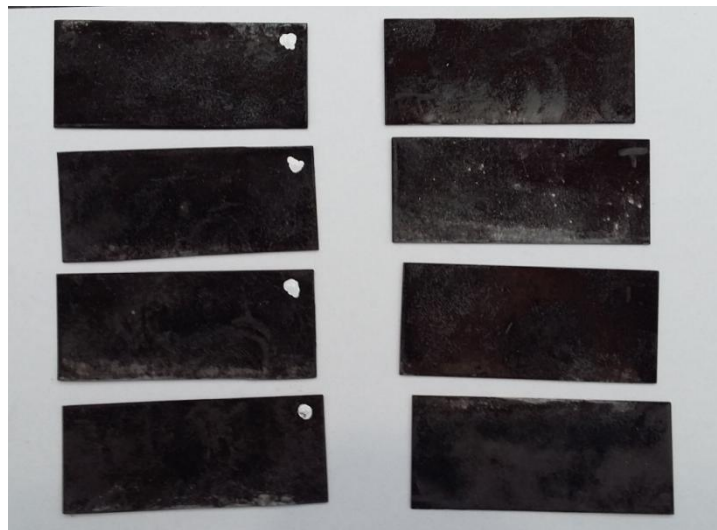


Figura 4.5.4. Probetas de acero recocidas para ser sometidas a proceso de doblado (numeración de las probetas según la Tabla 3.3.1: 57-64).

En la Tabla 4.5.1 se muestran los ángulos de recuperación medidos y calculados, en la Tabla 4.5.2 se indican los $\Delta\theta/\theta$ teóricos y experimentales para los ρ/t que han sido calculados y en la Figura 4.5.5 se representan gráficamente los valores de la Tabla 4.5.2.

Tabla 4.5.1. Ángulos de recuperación teóricos y experimentales para el acero.

NÚMERO PROBETA	EXPERIMENTAL		TEÓRICO $\Delta\theta$ [°]	DESIGNACIÓN
	$\Delta\theta$ [° ']	$\Delta\theta$ [°]		
57	-	-	-	AC08L2R1
58	1° 39' -1°	1,6500 -1	1,0533	AC08L2R2
59	7° 42' 6° 31'	7,7000 6,5167	1,9728	AC08L2R3
60	7° 40' 9° 17'	7,6667 9,2833	4,3134	AC08L2R4
61	-	-	-	AC08T2R1
62	3° 35' 2° 45'	3,5833 2,7500	1,0533	AC08T2R2
63	8° 28' 7° 3'	8,4667 7,0500	1,9728	AC08T2R3
64	8° 0' 8° 40'	8,0000 8,6667	4,3134	AC08T2R4

Tabla 4.5.2. Relaciones ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el acero recocido.

Acero DC01 RECOCIDO		
ρ/t	$\Delta\theta/\theta$	$\Delta\theta/\theta$
	Teórico	
3,9375	0,0117	-
7,375	0,0219	-
16,125	0,0479	-
	Práctico L recocido	
3,9375	0,0183	0,0111
7,375	0,0856	0,0724
16,125	0,0851	0,1031
	Práctico T recocido	
3,9375	0,0398	0,0306
7,375	0,0941	0,0783
16,125	0,0889	0,0963

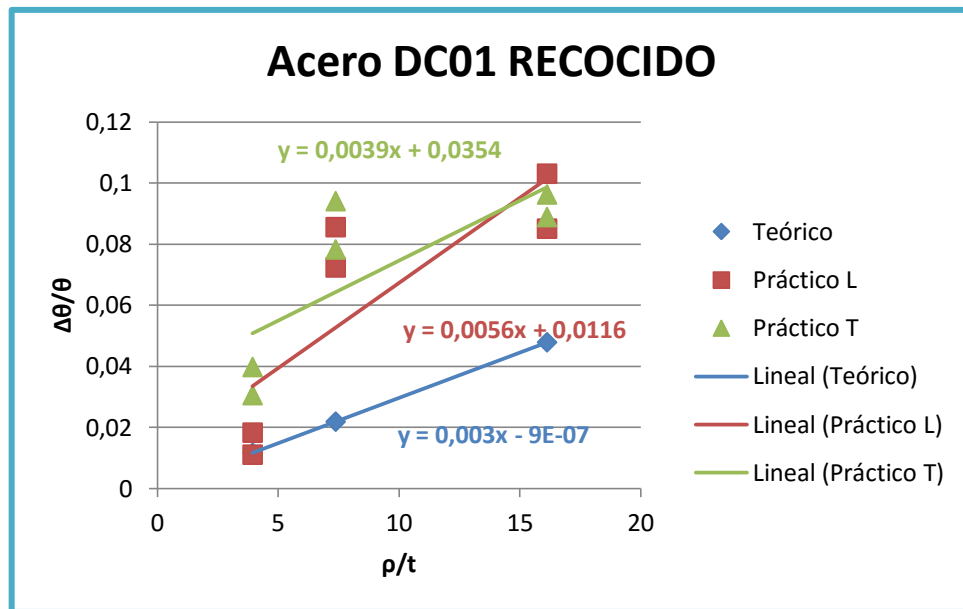


Figura 4.5.5. Representación gráfica del ángulo de recuperación/ángulo de la matriz teóricos y experimentales para las relaciones curvatura línea media/espesor de los tres radios de doblado en el acero recocido.

En la Figura 4.5.5 se ven como los valores negativos desaparecen y la recta experimental en T casi que coincide en la pendiente con la teórica. Los valores teóricos y experimentales en el ensayo del punzón más pequeño mejoran, viéndose afectado los ensayos con el punzón de 5,5 mm, que en este caso empeoran en los resultados.

A continuación se muestra la Figura 4.5.6 las chapas plegadas del acero DC01 tras el tratamiento de recocido.



Figura 4.5.6. Chapas plegadas del acero DC01 tras el tratamiento de recocido.

Capítulo 5

Propuesta de práctica

PRÁCTICA DE CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA. PLEGADO EN V. RECUPERACIÓN ELÁSTICA.

Introducción

Para obtener el valor del ángulo recuperación en la descarga de una chapa con comportamiento elástico-perfectamente plástico, se deduce en teoría la ecuación siguiente:

$$-\frac{\Delta\theta}{\theta} \approx 3 \left(\frac{S}{E'} \right) \left(\frac{\rho}{t} \right) \quad (1)$$

Donde:

$\Delta\theta$ es el valor del ángulo de recuperación elástica

θ el valor del ángulo de la matriz que se desea obtener en la chapa

S es la tensión de fluencia característica del material, en condiciones de deformación plana

E' el módulo elástico del material en condiciones de deformación plana $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$

ν el coeficiente de Poisson del material

t el espesor de la chapa

ρ es el radio de curvatura de la línea neutra, $\rho = R + \lambda t$, siendo R el valor del radio inicial y

$$\lambda = \begin{cases} 0,33 & \frac{R_i}{t} \leq 0,2 \\ \downarrow \text{variando} & \\ 0,50 & \frac{R_i}{t} > 4 \end{cases}$$

A continuación se muestra la geometría de la chapa plegada (Figura 1).

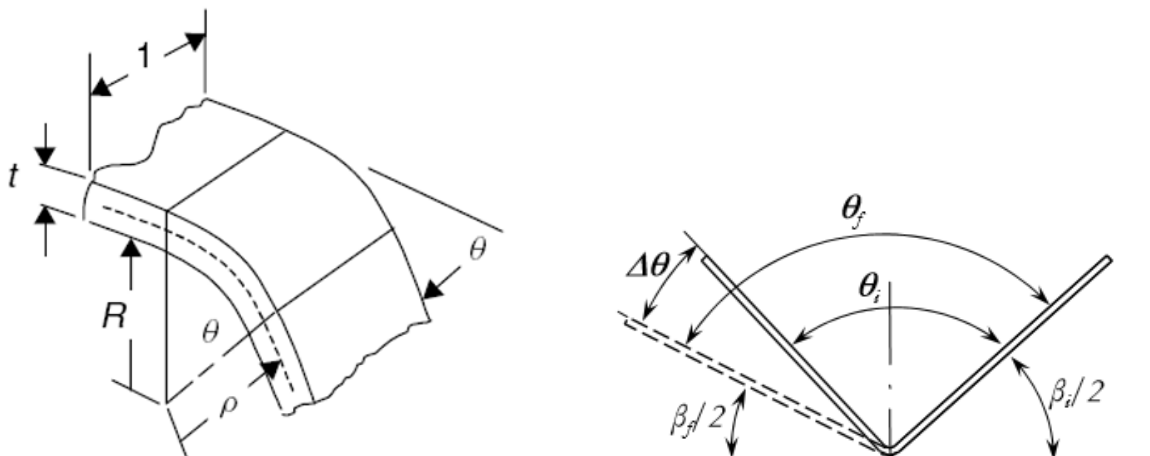


Figura 1. Geometría y nomenclatura de la chapa plegada.

Objetivos

El objetivo fundamental de esta práctica es hacer un análisis de semejanza entre la teoría y la práctica de la recuperación elástica del proceso de doblado en V, estudiando distintos parámetros del doblado y propiedades del material.

Tareas a realizar

- *Identificar y marcar las probetas.*
- *Realizar los ensayos de doblado.*
Se realizarán 6 ensayos de doblado para cada material que se experimenta, 3 en dirección longitudinal a la laminación y otros 3 en dirección transversal, uno por punzón.
- *Medir el ángulo de recuperación.*
Con el proyector de perfiles se medirán todos los ángulos de recuperación de todos los ensayos realizados.
- *Realizar los cálculos teóricos del fenómeno de recuperación elástica que experimentan los distintos materiales en el ensayo de doblado en V según la ecuación (1).*
- *Hacer un análisis comparativo de la teoría y la práctica, estudiada y experimentada.*
Se representarán en una gráfica la ecuación teórica y la que se obtiene de la experimentación, con el fin de poder sacar conclusiones acerca de esta práctica. En la Figura 2 se representa un ejemplo de la gráfica a realizar.

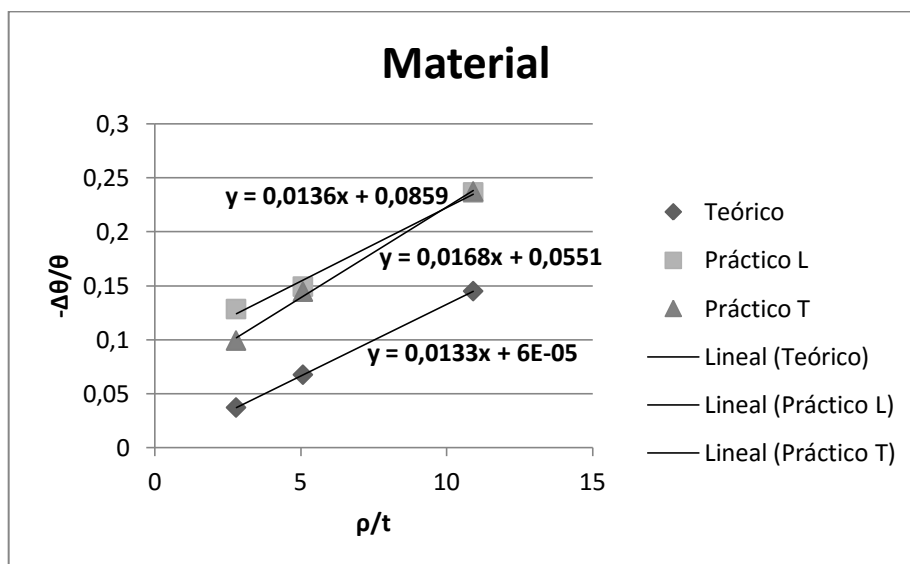


Figura 2. Representación gráfica.

Equipos a emplear

- Equipo de doblado en V con punzón de radio 2,75 mm.
- Equipo de doblado en V con punzón de radio 5,5 mm.
- Equipo de doblado en V con punzón de radio 12,5 mm.
- Proyector de perfiles para la medición del ángulo.

Hoja de trabajo

Ficha técnica del material

Las fichas técnicas de los materiales de trabajo se adjuntan en el Anexo de práctica.

Toma de datos teóricos

Según las propiedades de los materiales (Anexo de práctica), características del proceso y ecuación (1), se completan las Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Propiedades del material y características del proceso.

θ	S	E'	t	λ

Tabla 2. Parámetros según la ecuación (1).

R_i [mm]	ρ	$\Delta\theta$	$\frac{\rho}{t}$	$\frac{\Delta\theta}{\theta}$
2,75				
5,5				
12,5				

Toma de datos experimentales

Una vez realizados los ensayos de doblado y medidos los ángulos de recuperación, se completa la Tabla 3 (para ensayos en probetas en la dirección L de la laminación) y la Tabla 4 (para ensayos en probetas en la dirección T de la laminación).

Tabla 3. Datos tomados del ensayo en L.

Material:		Dirección: L	
R_i [mm]	$\Delta\theta$	$\frac{\rho}{t}$	$\frac{\Delta\theta}{\theta}$
2,75			
5,5			
12,5			

Tabla 4. Datos tomados del ensayo en T.

Material:		Dirección: T	
R_i [mm]	$\Delta\theta$	$\frac{\rho}{t}$	$\frac{\Delta\theta}{\theta}$
2,75			
5,5			
12,5			

Representación gráfica

Se representarán en una misma gráfica, similar a la mostrada en la Figura 2, los distintos $-\Delta\theta/\theta$ frente a los ρ/t para cada punzón, tanto teórica (a través de la ecuación 1) como experimentalmente (medidos en la práctica). Para ello completar previamente la Tabla 5 con los valores que serán representados en la gráfica.

Tabla 5. Valores representados en la gráfica.

MATERIAL:				
Radio de punzón [mm]	ρ/t	$-\Delta\theta/\theta$ Teórico	$-\Delta\theta/\theta$ Práctico	
			L	T
2,75				
5,5				
12,5				

Análisis de resultados

Realizar un análisis crítico sobre las similitudes y discrepancias de la teoría y la práctica de la recuperación elástica del proceso de doblado en V.

Anexo de práctica

Anexo I. Ficha técnica del Aluminio 2024T3

CUSTOMER PO NUMBER: 4500038544										WORK PACKAGE: SH-AIR-MAZ-T		CUSTOMER PART NUMBER: 20684		SHIP RUN/LOAD: 102824/16		GOV'T CONTRACT NUMBER:	
KAISER ORDER NO: 1163095			LINE ITEM: 1		SHIP DATE: 10-JAN-2014		ALLOY: 2024		CLAD: BARE		TEMPER: T3		PRODUCT DESCRIPTION: HT Flat Sheet				
WEIGHT SHIPPED: 5017 LB			QUANTITY: 214 PCS EST.			TRUCK B/L #: 2045851			GAUGE: 1.2000 MM (0.0472 IN)			DIAMETER/WIDTH: 1250.0 MM (49.210 IN)			LENGTH: 2500.0 MM (98.430 IN)		

Lot: **761293A0** Cast 649 Drop 19 Ingot 1 Parent Lot: 663515A5 Melted in USA

(ASTM E8/B557)

(EN 2002-1)

Tensile:	Temper	Dir / # Tests	Ultimate KSI (MPA)	Yield KSI (MPA)	Elongation %
	T3	LT / 2 (Min:Max)	68.0 : 68.0 (469 : 469)	45.5 : 45.6 (314 : 314)	18.6 : 18.7

Modulus of Elasticity (tensile test) = 73 GPa

Poisson's Ratio = 0.33

Capítulo 6.

Conclusiones

6.1 Conclusiones generales

- La conclusión más destacada en todo el proyecto es el claro paralelismo que existe entre la ecuación teórica de la recuperación elástica (4.1.1) y la recta experimental que surge de la medición de ángulos, lo que llevaría a pensar sobre la falta de un término constante en la ecuación.
- Las diferencias entre los ensayos L y T no comprenden magnitudes significativas, en ocasiones ni siquiera se cumple que la recuperación en L sea mayor que en T, ya que cualquier pequeño error en la experimentación o en la medida influiría en esta pequeña diferencia.
- Las propiedades y estados de los materiales son los que más influyen en el fenómeno de la recuperación elástica, lo que llevaría a decir que para sacar conclusiones más precisas, se deberían someter los distintos materiales a tratamientos previos para que estuvieran dotados de iguales condiciones a la hora de realizar los ensayos.
- El llevar a cabo un mayor número de repeticiones para cada variable experimental permitiría obtener conclusiones más precisas.

6.2 Acero

- El acero ha resultado ser el material más difícil sobre el que poder realizar unas conclusiones más precisas, por el mal estado en el que se encontraba la chapa, específicamente por la presencia ondulaciones.
- La no homogeneidad del material hace que los resultados de ensayos en idénticas condiciones sean dispares entre sí, más si se toman muestras de zonas de la plancha muy distintas.
- Los valores negativos de la recuperación elástica de este material en los ensayos con el punzón de radio 2,75 mm, llevan a pensar que el material pudiera venir provisto de tensiones residuales significativas del proceso previo de laminación, para la fabricación de las planchas.

- Con el tratamiento térmico de recocido para alivio de tensiones aplicado, los resultados mejoran desapareciendo el valor negativo de las recuperaciones, aunque todavía se aprecia su no homogeneidad en los resultados.
- El recocido hace que los resultados del punzón de radio menor mejoren, en cambio, lo que daba un resultado bastante bueno sin el tratamiento en el punzón de radio 5,5 mm, hace que empeore bastante, probablemente porque las tensiones residuales en sentido inverso hacían que el valor de la recuperación real se viera disminuido.
- Respecto al tratamiento previo de pretensado, los resultados evidencian la oposición que pone el material a ser plastificado, debido al fenómeno de endurecimiento por deformación previo al que se somete con el ensayo de tracción. Este hecho lleva intrínseco un aumento del ángulo de recuperación en el proceso de doblado.
- El pretensado hace que mejore el comportamiento del acero, posiblemente por el estiramiento que sufre el material, combatiendo las ondulaciones de las que viene previsto.
- Debido a todas las dificultades que presenta y la dispersión en los resultados, se podría decir que sería un material objeto de estudio, pero no apto para sacar conclusiones del fenómeno de recuperación elástica en una práctica adaptada para los alumnos.
- Toda la dificultad que opone este material a sacar conclusiones precisas, debido a su comportamiento no esperado, puede venir definido por un hecho del que advierten todos y cada uno de sus fabricantes. Los que conocen bien este material aconsejan no utilizar las planchas en un plazo superior a 6 semanas, a partir de su puesta a disposición. Un hecho que se hace difícil de controlar en un taller de laboratorio de prácticas, donde se almacenan retales de los materiales sin un control en el tiempo.
- Debido a la conclusión que se cita en el párrafo anterior, el acero de grado DC01 no es aconsejable para la docencia del fenómeno de la recuperación elástica en el doblado.

6.3 Aluminio

- El aluminio es un material con comportamientos muy diferentes según composición y tratamientos aplicados, pudiendo llegar a convertirse en el material más dúctil experimentado en este proyecto, con menos recuperación elástica (aluminio 1050H14), y en contraposición, el único que llega a la rotura (aluminio 7075T6).

- El aluminio 2024T3 es un clarísimo reflejo de lo que se cita en la primera conclusión de este capítulo, pues las ecuaciones de las rectas teóricas y prácticas cumplen un casi perfecto paralelismo en sí.
- La teoría de que la recuperación elástica en las probetas en dirección de la laminación (L) es ligeramente mayor que en las de dirección transversal (T), siempre se cumple en la experimentación del aluminio 2024T3.
- El ensayar el aluminio 2024T3 en dos espesores diferentes (1,2 mm y 1,6 mm) abre la posibilidad de analizar el parámetro del espesor, viendo como el aumento de éste conduce a una reducción en el ángulo de recuperación.
- El aluminio 1050H14, la dificultad que presenta a la hora de obtener conclusiones precisas es el rango tan pequeño en el que se mueven las recuperaciones elásticas, donde un pequeño error en la medida daría grandes diferencias en la gráfica de incrementos de ángulos medidos.
- Por excelencia, de todos los metales experimentados, el que mejor podría acomodarse para ser llevado a unas prácticas con el alumnado, sería el aluminio 2024T3 en ambos espesores (1,2 mm y 1,6 mm), introduciendo así el análisis de la influencia de este parámetro.
- Respecto al pretensado que sufre el aluminio 2024T3, puede verse como este parámetro puede llevar a la rotura del material fácilmente.

6.4 Titanio

- El titanio manifestó en los ensayos un elevado ángulo de recuperación debido al alto valor de la tensión de fluencia que la caracteriza.
- Se vuelve a cumplir la condición de paralelismo entre las ecuaciones de las rectas, y lo que no se obtiene esta vez es que la dirección L en las probetas experimentan mayor recuperación elástica, aunque también hay que decir que las diferencias entre L y T son pequeñas.
- Sin duda, el mejor metal para ver la repercusión del fenómeno de recuperación elástica que se estudia en este proyecto, pero difícil de aplicar en prácticas para alumnos, debido al elevado coste que presenta en el mercado.

Capítulo 7.

Trabajos Futuros

- Realizar una batería más amplia de ensayos experimentales en igualdad de condiciones, para poder evaluar mejor la dispersión experimental que aparece en la práctica.
- Hacer una calibración de los equipos de medidas empleados en la medición de variables experimentales, para así afinar y ajustar los cálculos en las que éstas intervienen.
- Dada la distinción que se manifiesta entre los distintos materiales, se propone ampliar la cantidad de ellos a ensayar, para poder analizar otros comportamientos.
- Ya que no ha sido posible realizar los ensayos con el punzón de radio 1 mm, sería interesante poder ver el comportamiento de los materiales estudiados ante el cambio de este parámetro. También se podría contemplar fabricar y ensayar otros punzones con radios diferentes.
- Experimentar el acero DC01 justo cuando se produce su puesta a disposición por el fabricante, para así poder verificar que es el envejecimiento que éste experimenta, el que lleva a resultados no esperados.
- Variar las condiciones de ensayo, como son llevar las probetas a mayores endurecimientos por deformación (mayor deformación de pretensado) y a tratamientos térmicos de alivio de tensiones con controles más precisos.
- Trabajar un software que permita hacer un ajuste preciso entre la teoría y la práctica que actualmente viene dado por un campo definido, pero desconocido.
- Una vez que se ponga en funcionamiento la práctica de laboratorio, se podría ajustar la docencia sobre la propuesta hecha, para mayor comodidad de trabajo entre los alumnos.

Capítulo 8.

Bibliografía

- © ArcelorMittal. (08 de Enero de 2006). *Aceros de alta conformabilidad para estampación*. Recuperado el 10 de Abril de 2016, de Catálogo de productos de Acelor Mittal: http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/K_ES.pdf
- © ArcelorMittal. (10 de Junio de 2015). *Extracto del catálogo de productos*. Obtenido de <http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/ArcelorMittal%20Automotive%20product%20offer%20ES.pdf>
- © ISO. (15 de Agosto de 2009). *ISO 6892-1:2009*. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de Metallic materials — Tensile testing: <http://files.instrument.com.cn/FilesCenter/20090913/200991371610112081.pdf>
- Aerospace Specification Metals INC. (s/f). *Aluminum 7075-T6; 7075-T651*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>
- ALACER MAS. (s/f). *Propiedades del Aluminio Puro 99,5%*. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de Catálogo Técnico del Aluminio: http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_1050_aluminio.pdf
- ALACERMAS. (s/f). *PROPIEDADES ALEACIÓN -7075- (ALUMINIO – ZINC)*. Recuperado el 16 de Abril de 2016, de http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_7075_aluminio.pdf
- ALCOA. (s/f). *ALCOA MILL PRODUCTS*. Recuperado el 11 de Mayo de 2016, de https://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf
- American Society for Metals. (1998). *Metals Handbook* (2ª ed.). ASM International.
- ASM International. (1990). *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*.
- ASTM. (1999). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Recuperado el 22 de Abril de 2016, de ASTM E8-M99.
- Barbarin Matute, I. (12 de Septiembre de 2014). *DISEÑO DE TROQUELES PARA LA FABRICACIÓN DE LA PIEZA SOPORTE PULSADOR*. Recuperado el 22 de Mayo de 2016, de ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE LA UNIVERSIDAD PUBLICA NAVARRA: <file:///C:/Users/Kristo/Downloads/629236.pdf>
- Bibliografia de Cátedra. (26 de Agosto de 2014). *Tipos de Matrices*. Recuperado el 26 de Marzo de 2016, de Matriceria: <https://bibliografiadecatedra.wordpress.com/tag/matriceria/>
- BibuchSL©. (2015). *Aerosol Monobloque*. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de Embases y Embalajes Bibuch: <https://bibuch.es/concept/717-envases-y-recipientes/1148-3-2-aerosol-monobloque-es-de.html>

- Blanco Álvarez, F. (2013-2014). *Comformado en frío. Bases metalúrgicas del comportamiento mecánico en frío*. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de Universidad de Oviedo. Escuela de Minas. Tecnología de Materiales:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema3.ProcesosConformadoFrio.MaterialesMetalicos.pdf>
- CALLISTER, W. D., & RETHWISCH, D. G. (2016). *CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES* (9ª ed.). (P. Molera Solà, & N. Salán Ballesteros, Trans.) Barcelona: EDITORIAL REVERTÉ, S. A.
- *Características Mecánicas del Acero*. (s/f). Recuperado el 30 de Abril de 2016, de Ingemecanica:
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html>
- Carballo, I. (2010). *Doblado de Laminas Metálicas*. Recuperado el 06 de Mayo de 2016, de Universidad Veritas. Diseño de Producto. Tecnología I:
<https://issuu.com/ivoncarballo/docs/doblado>
- Castro Patiño, L. F. (s/f). *Condiciones Técnicas para un Correcto Doblado*. Recuperado el 28 de Abril de 2016, de METALACTUAL: <http://www.metalactual.com/revista/15/doblado.pdf>
- Cerón Hoyos, J. E. (Marzo de 2013). *TESIS DOCTORAL. DESARROLLO DE ASPECTOS METODOLÓGICOS EN EL DISEÑO DE MATRICES PROGRESIVAS*. Recuperado el 18 de Abril de 2016, de DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y TÉCNICAS DE EXPRESIÓN GRÁFICA. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA:
<http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/2570/TesisJECH.pdf?sequence=1>
- Corporación Universitaria del Caribe. (16 de Marzo de 2013). *Doblado. Doblado en V*. Recuperado el 30 de Marzo de 2016, de
<http://industrialmaterials20xx.blogspot.com.es/2013/03/doblado.html>
- CRP MECCANICA S.r.l. (s/f). *Aluminum 7075-T6; 7075-T651*. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de <http://www.crpmeccanica.com/PDF/aluminium-7075-t6-7075-t651.pdf>
- CRP MECCANICA S.r.l. (s/f). *Titanio Ti-6AL4V*. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de Las aleaciones de titanio Ti-6AL4V: <http://www.crpmeccanica.com/PDF/titanium-ti-6al-4v-annealed-ams-4928.pdf>
- De Vin, L. (1994). *Computer Aided Process Planning for the Bending of Sheet Metal Components*. Tesis Doctoral. Universidad de Twente.
- ECURED. (s/f). *Ensayo de doblado*. Recuperado el 24 de Marzo de 2016, de ECURED. Conocimiento con todo y para todo: http://www.ecured.cu/Ensayo_de_doblado#Fuentes
- ELCHAPISTA.COM. (s/f). *Técnicas de alineación en Bancada. Planificación y preparación 2ª Parte*. Recuperado el 18 de Marzo de 2016, de
http://www.elchapista.com/bancadas_planificacion_2.html
- *Ensayo de Doblado del Acero*. (s/f). Recuperado el 22 de Marzo de 2016, de INGENIERÍA CIVIL. Proyectos y apuntes teórico-prácticos de Ingeniera Civil para compartir con ustedes:
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/10/ensayo-de-doblado-del-acero.html>
- *Ensayo de tracción*. (19 de Abril de 2016). Recuperado el 16 de Mayo de 2016, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_tracci%C3%B3n

- *Ensayo de Tracción*. (s/f). Recuperado el 18 de Abril de 2016, de ensayo de Tracción: <http://materialesr2.galeon.com/productos734758.html>
- Escacena Ventura, J. M. (s.f.). *CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO 7075-T651*. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de e-REdING.Trabajos y Proyectos fin de estudios de la E.T.S.I.: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4089/fichero/6.pdf>
- Esteves, A. (1 de Septiembre de 2003). *Evolución de los procesos de corte y deformación de chapa*. Recuperado el 5 de Mayo de 2016, de DEFORMACIÓN Y CHAPA: <http://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/8647-Evolucion-de-los-procesos-de-corte-y-deformacion-de-chapa.html>
- Estévez Urra, A., Morales Palma, D., Bohórquez Jiménez, L. V., Martínez Donaire, A. J., Centeno Baez, G., Doblas Charneco, F. J., y otros. (2015). *Tecnología de Fabricación (Material Docente)*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.
- FundicionesGomez.S.A. (s/f). *Probeta para Ensayo de Tracción Plana 80x10x2*. Recuperado el 22 de Marzo de 2016, de Probeta para Ensayo de Tracción Plana 80x10x2: <http://www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-ensayo-de-TRACCION-PLANA-80x10x2>
- García-Lomas Jung, J., Valvellano Martín, C., Bohórquez Jiménez, L., & Sánchez Fulgueira, M. (2004-05). *Tecnología de Fabricación*. Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros. Univerdad de Sevilla.
- García-Romeu de Luna, M. L. (Julio de 2005). *Contribución al Estudio del Proceso de Doblado al Aire de Chapa. Modelo de Predicción del Ángulo de Recuperación y del Radio de Doblado Final*. Recuperado el 10 de Marzo de 2016, de Universitat de Girona. Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial: file:///C:/Users/usuario/Dektop/TRABAJO_FIN_GRADO/DOCUMENTOS/TESIS.pdf
- Gardinier, F. (1958). *The springback of metals* (Vol. 49). (ASEME, Trad.)
- Instituto Alemán de Normalización . (1975). Normas DIN para el acero.
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. (s/f). *ENSAYO DE DOBLADO PARA EL ACERO*. Recuperado el 28 de Marzo de 2016, de NORMA TÉCNICA ECUATORIANA: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0110.1975.pdf>
- Jurado Martínez, J., Martínez Perez, H., & Peralta Cruz, J. M. (09 de Diciembre de 2012). *Pocesos de Conformados Mecánicos*. Recuperado el 21 de Abril de 2016, de Instituto Tecnológico de TLALNEPANTLA: <http://es.slideshare.net/kikinamumu/procesos-15554388>
- Kalpakjian, S. (1991). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (2ª ed.). Addison-Wesley.
- Lange, K. (1997). Modern metal forming technology for industrial production. *Journal of Materials Processing Tecnology*.
- López Martínez, A., & López Martínez, J. (Enero de 2013). (A. López Martinez, Ed.) Recuperado el 14 de Abril de 2016, de http://www.ual.es/personal/alm212/documentos/TF_Teoria_v2.pdf

- Marciniak, Z. (1992). *Mechanics of Sheet Metal Forming* (1 ed.). Edward Arnold.
- METALASA. (s/f). *Aceros para embutición y conformación en frío*. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de PRODUCTOS SIDERURGICOS. DATOS Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES: <http://www.metalasa.es/files/Productos.pdf>
- METALASA. (s/f). *Productos Siderurgicos. Datos y Características Principales*. Recuperado el 28 de Abril de 2016, de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10065/Annex_B.pdf?sequence=14&isAllowed=y
- Montaña Anaya, J. F. (2004). *FORMADO DE METAL Y TRABAJO DE METALES. OPERACIONES DE DOBLADO*. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de PLAN GLOBAL TECNOLOGIA MECANICA II. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/plan.pdf>
- Montaña Anaya, J. F. (2004). *PLAN GLOBAL TECNOLOGIA MECANICA II*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-324.pdf>
- Montaña Anaya, J. F. (2004). *PLAN GLOBAL TECNOLOGIA MECANICA II*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-323.pdf>
- Ordoñez Jiménez, J. L. (s/f). *Hidroconformado, una Alternativa para el Modelado de Metal*. Recuperado el 22 de Marzo de 2016, de www.metalactual.com: http://metalactual.com/revista/24/procesos_hidro.pdf
- Ortola, S. (17 de Abril de 2009). *Manual del Aluminio y sus Aleaciones*. Recuperado el 14 de Agosto de 2016, de Blog Ingeniería y Materiales: <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>
- Paris, F. (2000). *Teoría de la Elasticidad* (3ª Edición ed.). Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM).
- *Propiedades Mecánico-Químicas del Aluminio*. (s/f). Recuperado el 30 de Abril de 2016, de Ingemecanica: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>
- Riba Romeva, C. (2008). *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. Recuperado el 08 de Mayo de 2016, de Universidad Politécnica de Cataluña: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36844/9788498804065.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salazar López, B. (2012). *PROCESOS DE CONFORMADO*. Recuperado el 4 de Abril de 2016, de INGENIERIAINDUSTRIALONLINE.COM: <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/procesos-industriales/procesos-de-conformado/>
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2004). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (4ª ed.). (G. Nagore Cázares, & P. A. González Caver, Trans.) México D.F.: MCGRAW-HILL.

- stevemorales27. (s/f). *EXTRUSION*. Recuperado el 22 de Abril de 2016, de EL RINCON DEL VAGO: <http://html.rincondelvago.com/extrusion.html>
- Tekkaya, E. E. (2000). State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*.
- The Institute for Human & Machine Cognition. (s/f). *PROCESOS DEFORMACION PLASTICA DE MATERIALES*. Recuperado el 28 de Mayo de 2016, de EMBUTIDO GENERAL: http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1NTC1NS0Y-24721W6-23QW/680px-EMBUTIDO_general.jpg
- Unión de Almacenistas de Hierros de España. (s/f). *PRODUCTOS PLANOS LAMINADOS EN FRÍO*. Recuperado el 04 de Mayo de 2016, de http://www.hierrossantander.com/hierros_prontuario/archivo/08-PRODUCTOS%20PLANOS%20LAMINADOS%20EN%20FRIO.pdf
- Univeridad de Coruña. (s/f). *PROPIEDADES Y ENSAYOS. ENAYOS ELEMENTALES*. Recuperado el 28 de Mayo de 2016, de ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/406/contenido_publico/recursos/TEMA_01_Ensayos_Elementales.pdf
- Universidad de Carabobo. (2017). *Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569*. Recuperado el 18 de Abril de 2016, de REVISTA INGENIERÍA UC: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v14n1/art7.pdfinzip>
- Universidad del País Vasco. Departamento de Ingenieria Mecánica. (08 de Septiembre de 2010). *TEMA 6: Conformado de chapa*. Recuperado el 10 de Abril de 2016, de Tecnologías de Fabricación y Tecnología de Maquinas: http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/399_ca.pdf
- Universidad Politécnica de Cartagena. (Marzo de 2006). *Seguridad estructural*. Recuperado el 16 de Abril de 2016, de Documento Básico SE-A: http://www.upct.es/~minaees/codigo_tecnico_acero.pdf
- Vallellano Martín, C., & García-Lomas Jung, F. J. (2010). *Bases para el Análisis de los Procesos de Conformado de Chapa*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
- Vallellano Martín, C., Erce Montilla, J. J., & García-Lomas Jung, F. J. (2004). *Predicción del Fallo en el Conformado Plástico de Chapa Mediante Criterios de Fractura Dúctil*. Sevilla: Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.
- Vallellano Martín, C., Marínez Donaire, A., Morales Palma, D., & García-Loma, F. J. (2010). On the use of Convex-Side Rule and Critical Distance Methods to Predict the influence of Bending on Sheet-metal Formability. *International Journal of Materials Forming*.
- Vasile, D., Vasile, D., Thamodhara, M., & Wolf, A. (2000). *The Use of Neural Network in Metal Industry*. Recuperado el 02 de Mayo de 2016, de CONFERENCE RECORD OF THE 2000 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE: file:///C:/Users/usuario/Desktop/00882569.pdf

- Vidal Gómez, E. (04 de Diciembre de 2013). *Estudio de la recuperación elástica en el doblado de chapa asistido por pulsos de alta densidad de corriente*. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de Departament de Mecànica. Universitat Politècnica de Catalunya:
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/20229/TFG_EUETIB_Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Anexo I

Códigos Matlab empleados

Anexo I.a Código para la ecuación 4.1.1.

```
%  $\Delta O/O = -3S/E_p \cdot r_o/t$ 
```

Ecuación 3.5.1

```
S=880*2/sqrt(3); %MPa
E=113.8e3; %MPa
v=0.2375; %adim
Ep=E/(1-v^2);
```

Se introduce el valor de todas las propiedades mecánicas y físicas del material (S, E y v).

```
R=[2.75; 5.5; 12.5];
t=0.5; %mm
lambda=0.5; %R/t>4
ro=R+lambda*t;
O=90;
AO=3*S/Ep*ro/t*O;
```

Con los tres radios de los punzones en milímetros (2,75 5,5 y 12,5) e introduciendo el valor del espesor (t) de la chapa para cada caso, se calculan entonces los tres valores de ρ/t para los que va a ser evaluado el $\Delta\theta/\theta$.

```
disp('AO')
disp(AO)
disp('AO/O')
disp(AO/O)
disp('ro/t')
disp(ro/t)
```

A continuación se pide que se imprima por pantalla los tres valores calculados de $\Delta\theta/\theta$ y ρ/t , necesarios para dibujar la gráficas. También se piden los valores de $\Delta\theta$ teóricos obtenidos, para que posteriormente puedan ser comparados con los resultados del ángulo de recuperación elástica experimental.

```
plot(ro/t,AO/O)
```

```
%% MATERIALES
```

```
%ACDC01 198 210e3 0.3 0.8
%AL2024T3 314 73e3 0.33 1.2
%AL2024T3 314 73e3 0.33 1.6
%AL1050H14 105 69e3 0.33 3
%AL7075T6 503 71.7e3 0.33 3.15
%TI6AL4V 880 113.8e3 0.2375 0.5
```

Por último se expone en el código la lista de todos los materiales con el valor de todas las propiedades necesarias para ejecutar el programa: S, E, v y t, respectivamente.

Anexo I.b Código para la ecuación 2.6.10.

```
Ri=[2.75 5.5 12.5]; %mm
S=880; %MPa
E=113.8e3; %MPa
t=0.5; %mm
F=Ri*S/E/t;
Rf=Ri./(4.*F.^3-3.*F+1)
```

```
%AL R 314 73E3 1.2
%AC R 198 210E3 0.8
%TI R 880 113.8E3 0.5
```

Anexo II

Representación gráfica de los ángulos de recuperación elástica

Intentando dotar a los alumnos de todos los conocimientos de interés que se pueden extraer de este proyecto sobre el fenómeno de recuperación elástica del proceso de doblado en V para distintos materiales y condiciones, se han fabricado varios expositores, con la idea de poder apreciar visualmente el fenómeno del *springback* en el proceso de doblado a noventa grados, para todos los casos experimentados en este trabajo.

Mediante una plantilla en ángulos donde se verá marcado el ángulo a 90°, se podrá apreciar el ángulo de apertura que ha experimentado cada chapa, para los distintos materiales, radios, espesores, dirección de laminación y procesos previos al doblado (variables experimentales).

A continuación, en la Figura A.1, se expone uno de los tres expositores que han sido diseñados y fabricados. Como se puede apreciar, cada una de las filas hace referencia a los ensayos para los distintos punzones (radios de 2,75 mm, 5,5 mm y 12,5 mm), en las columnas se señala el material y la dirección de laminación.

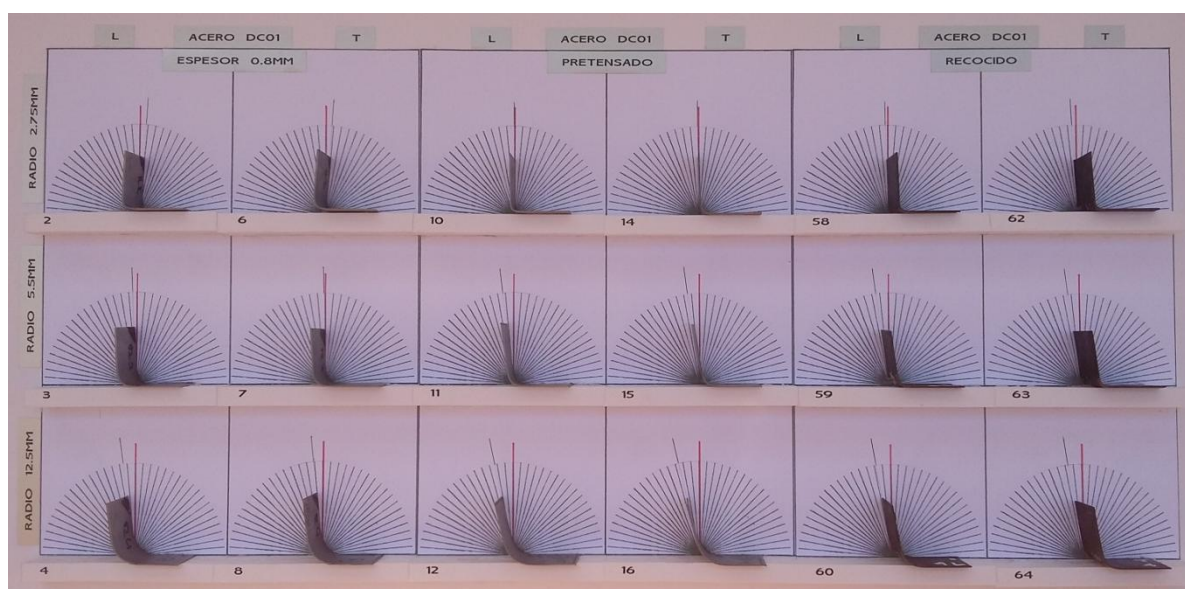
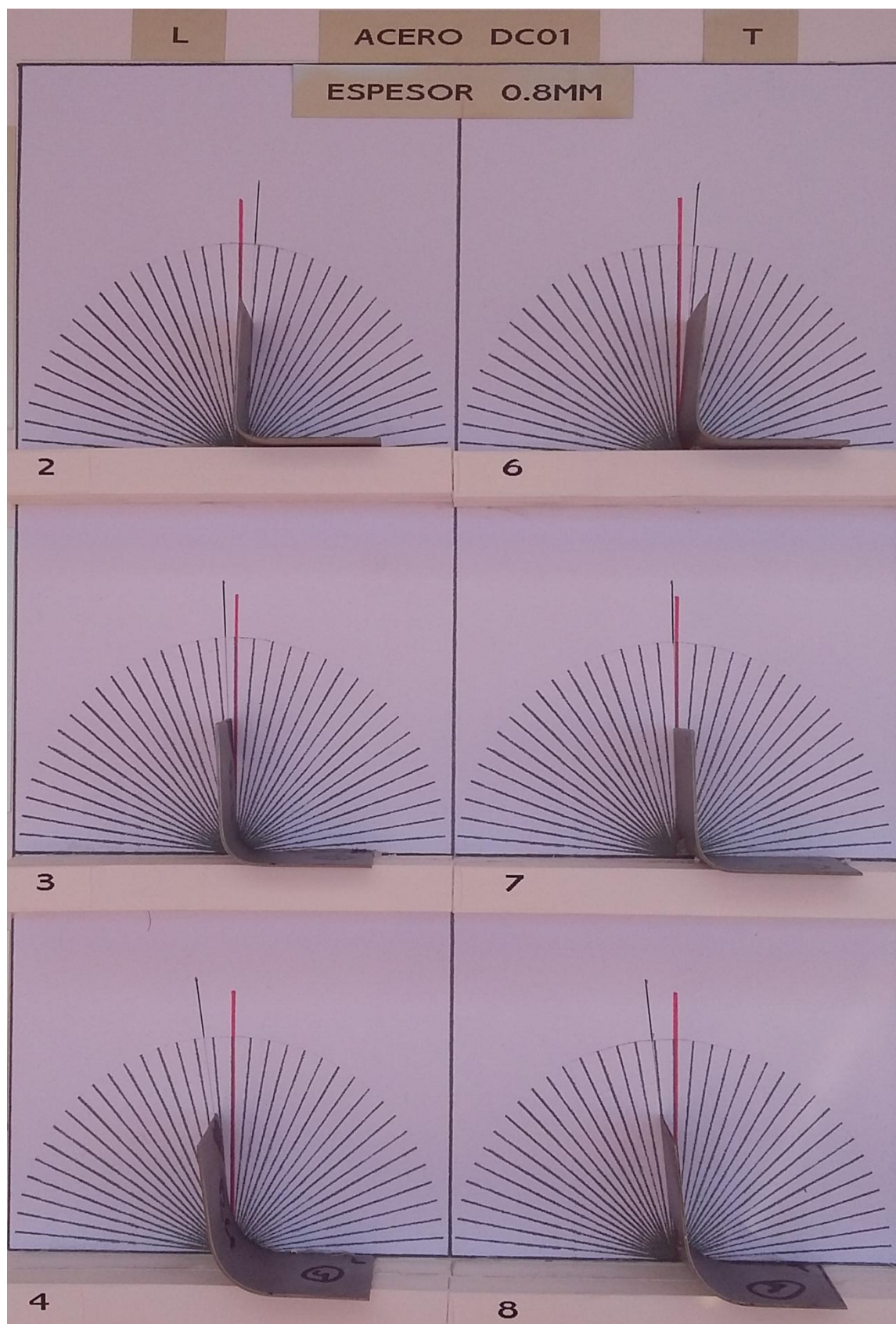
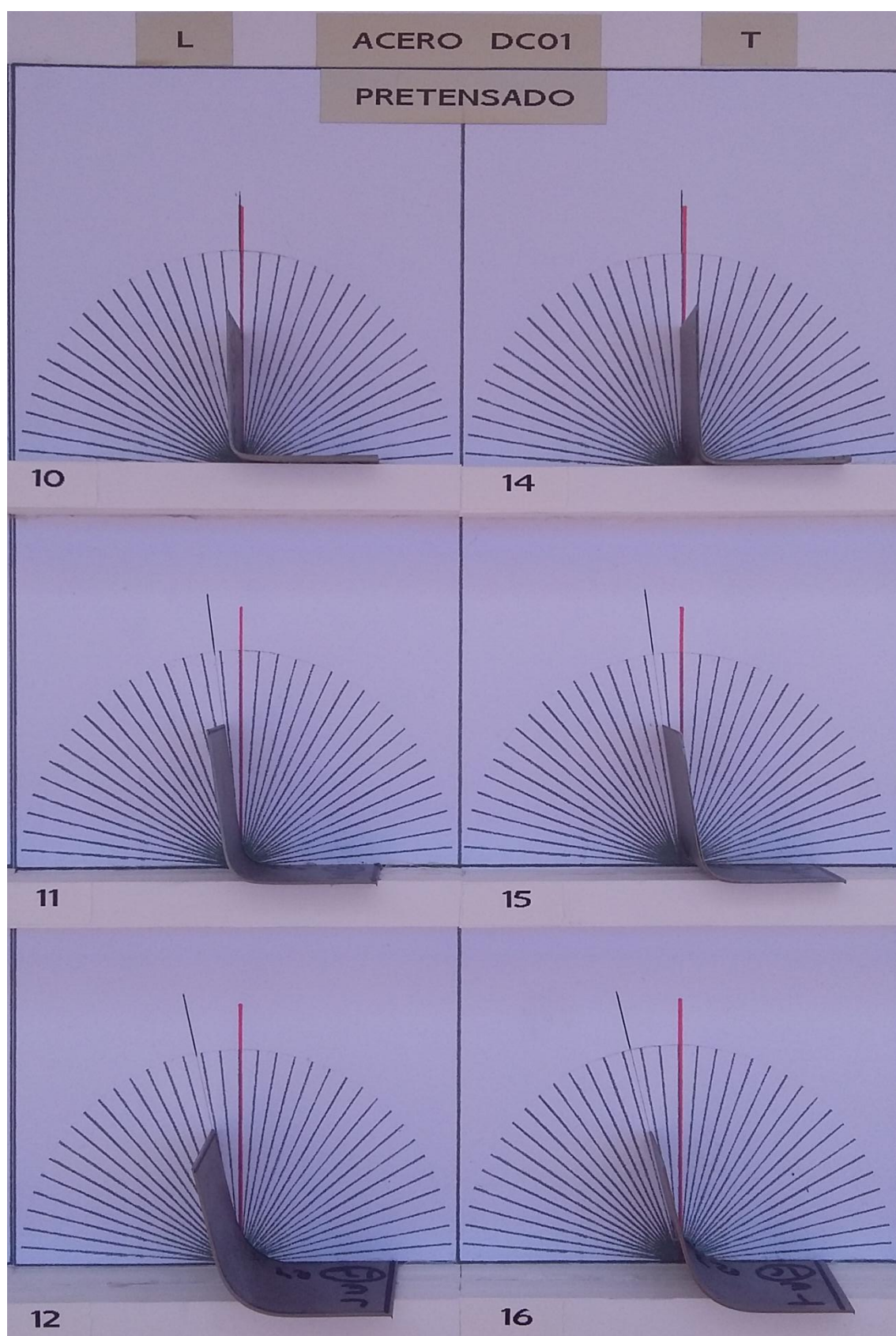
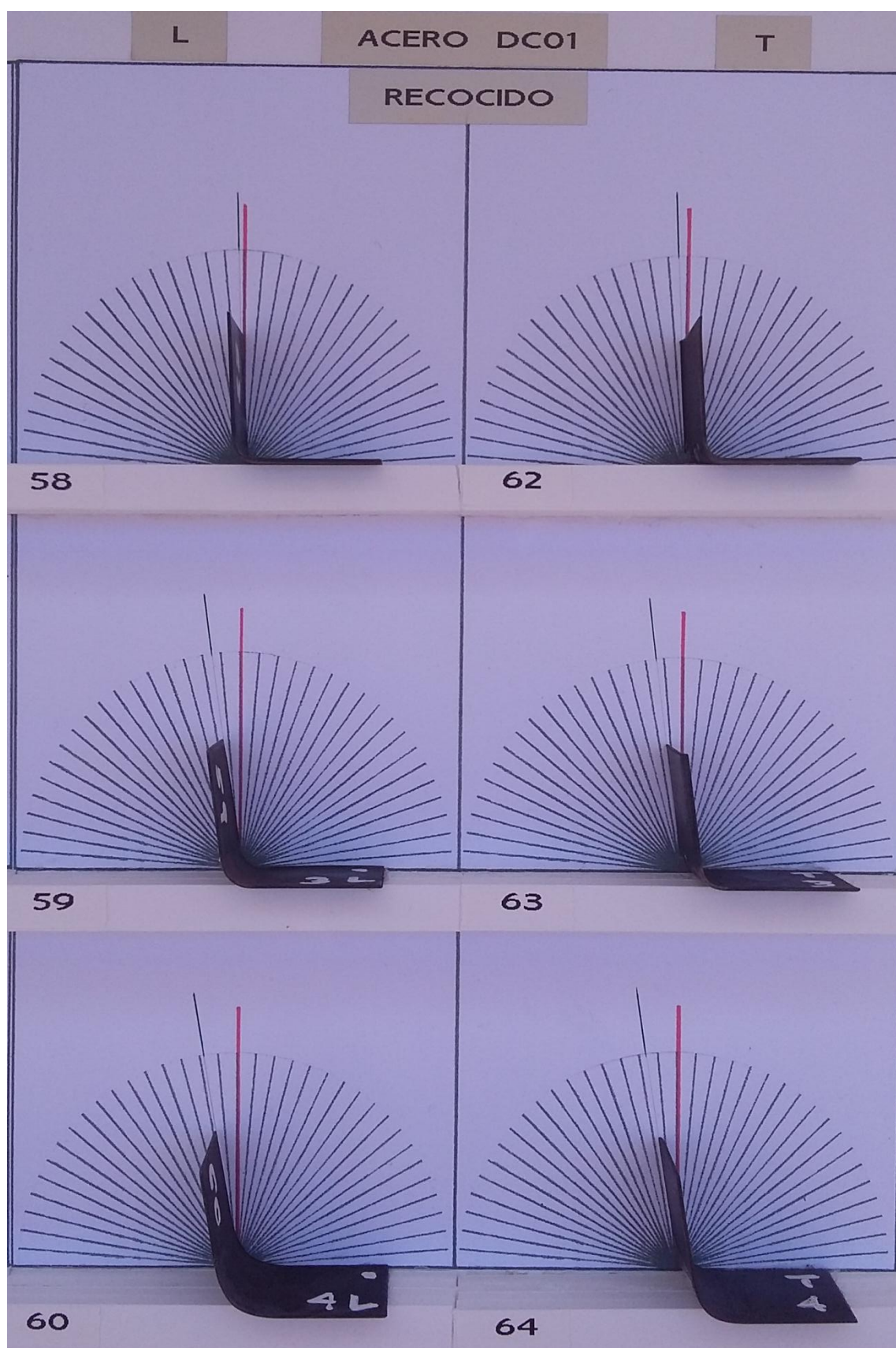


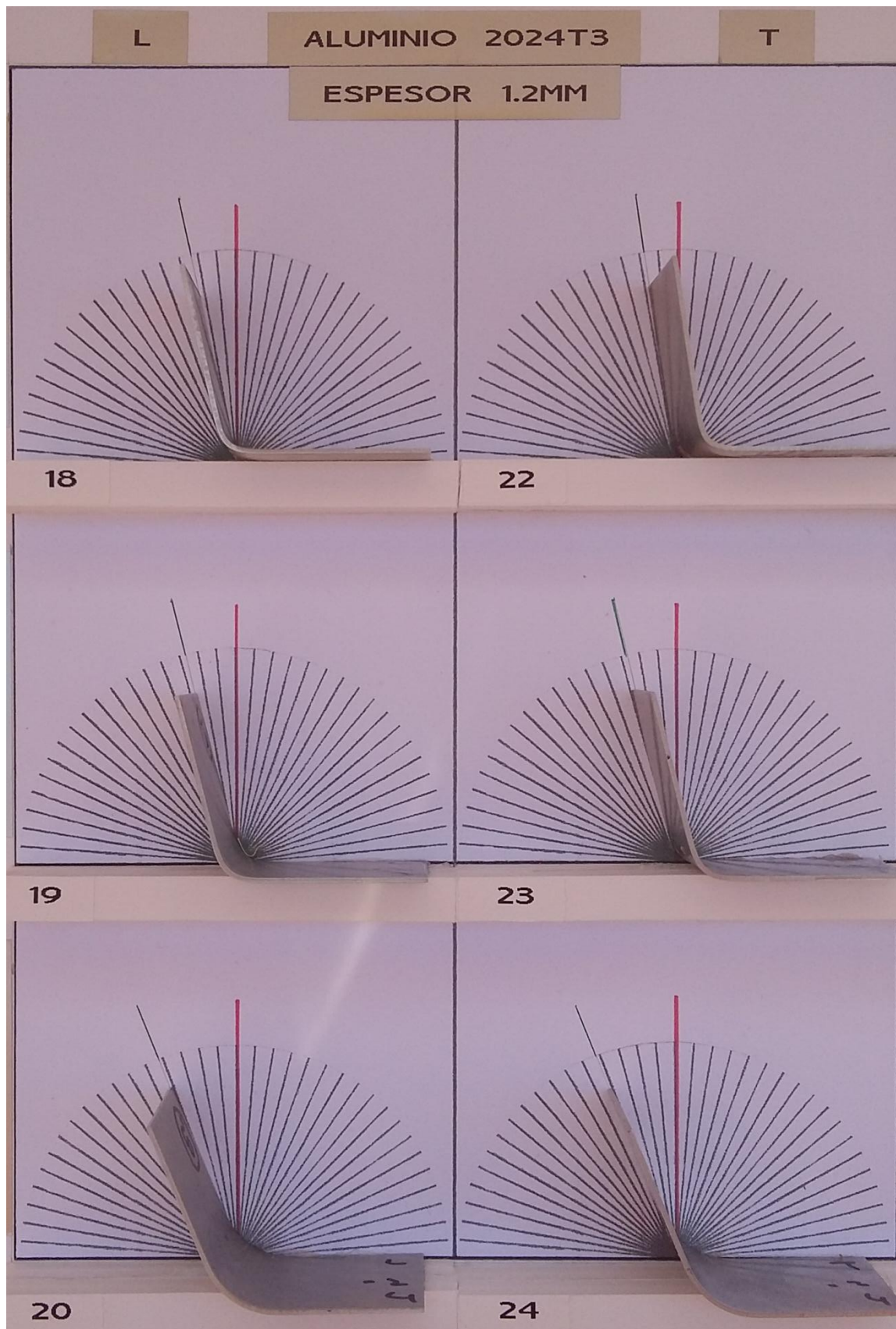
Figura A.1. Expositor del acero DC01 ensayado en todas las condiciones.

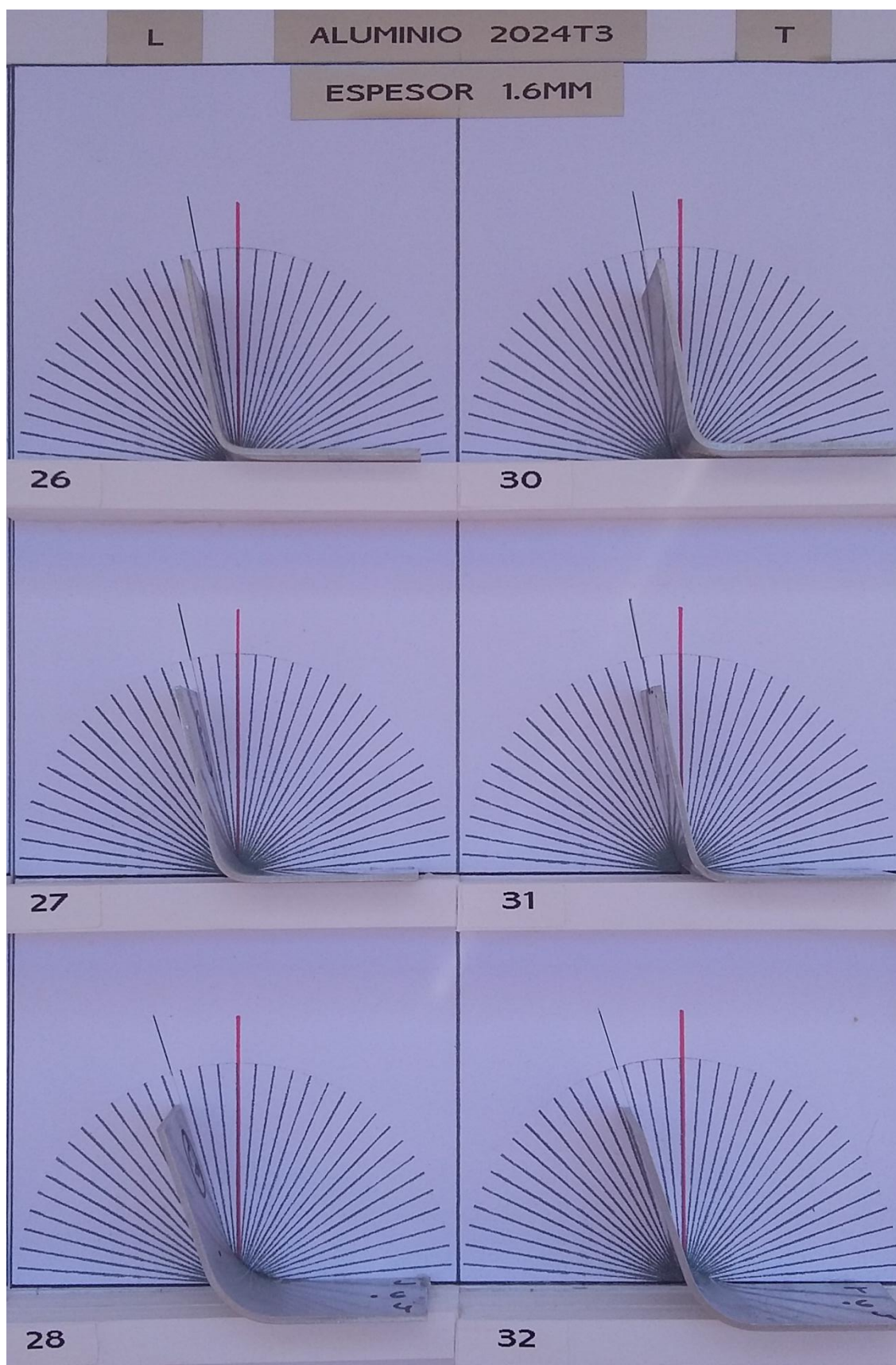
En las páginas posteriores se ilustran las ampliaciones de cada expositor para cada material experimentado. En la parte superior de las fotografías se señala qué material se expone y en qué dirección de laminación. Aunque no se especifique, como ya se ha dicho y señalado en la Figura A.1, las filas hacen referencia a cada radio de punzón, de menor a mayor medida.

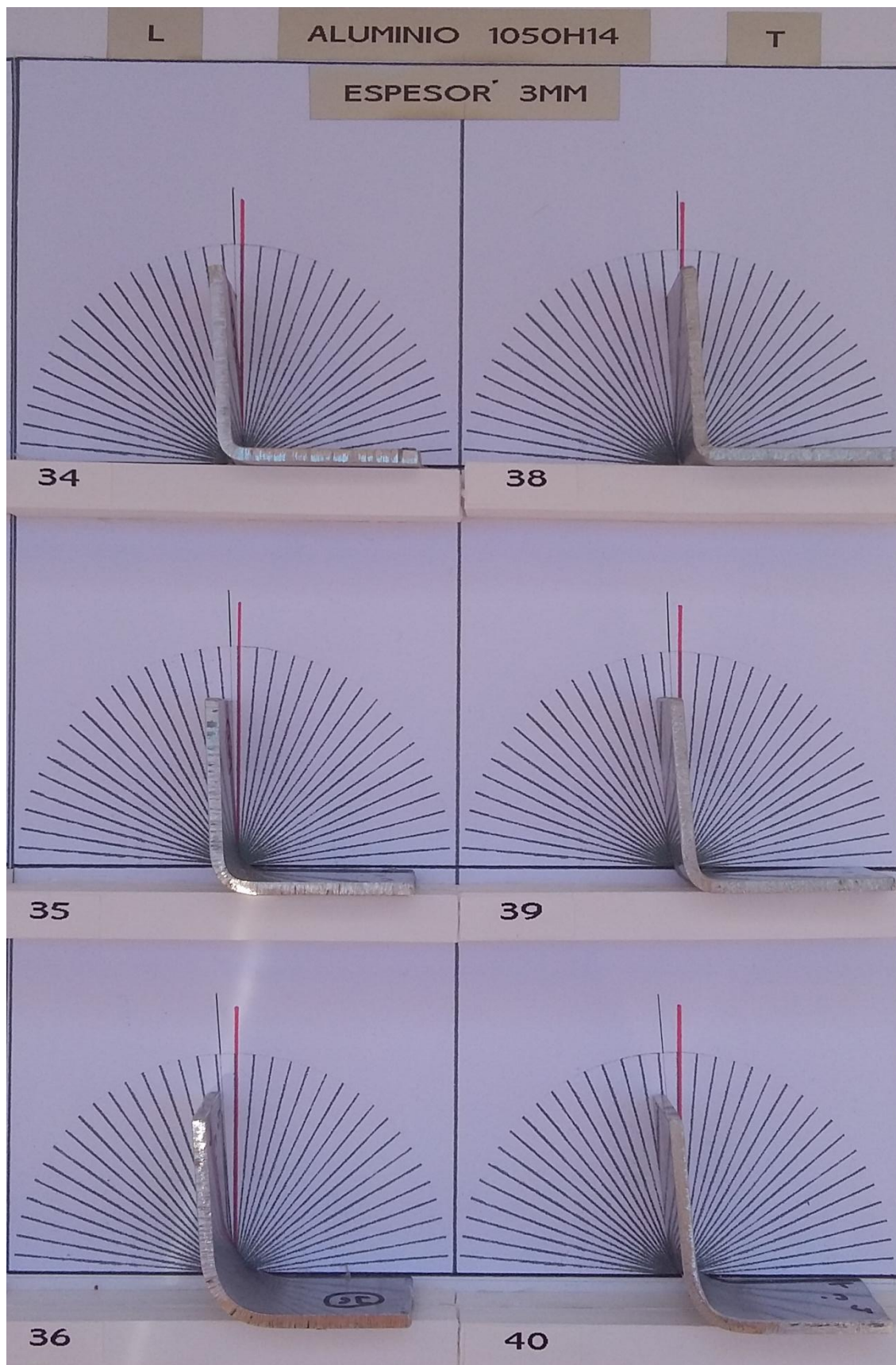


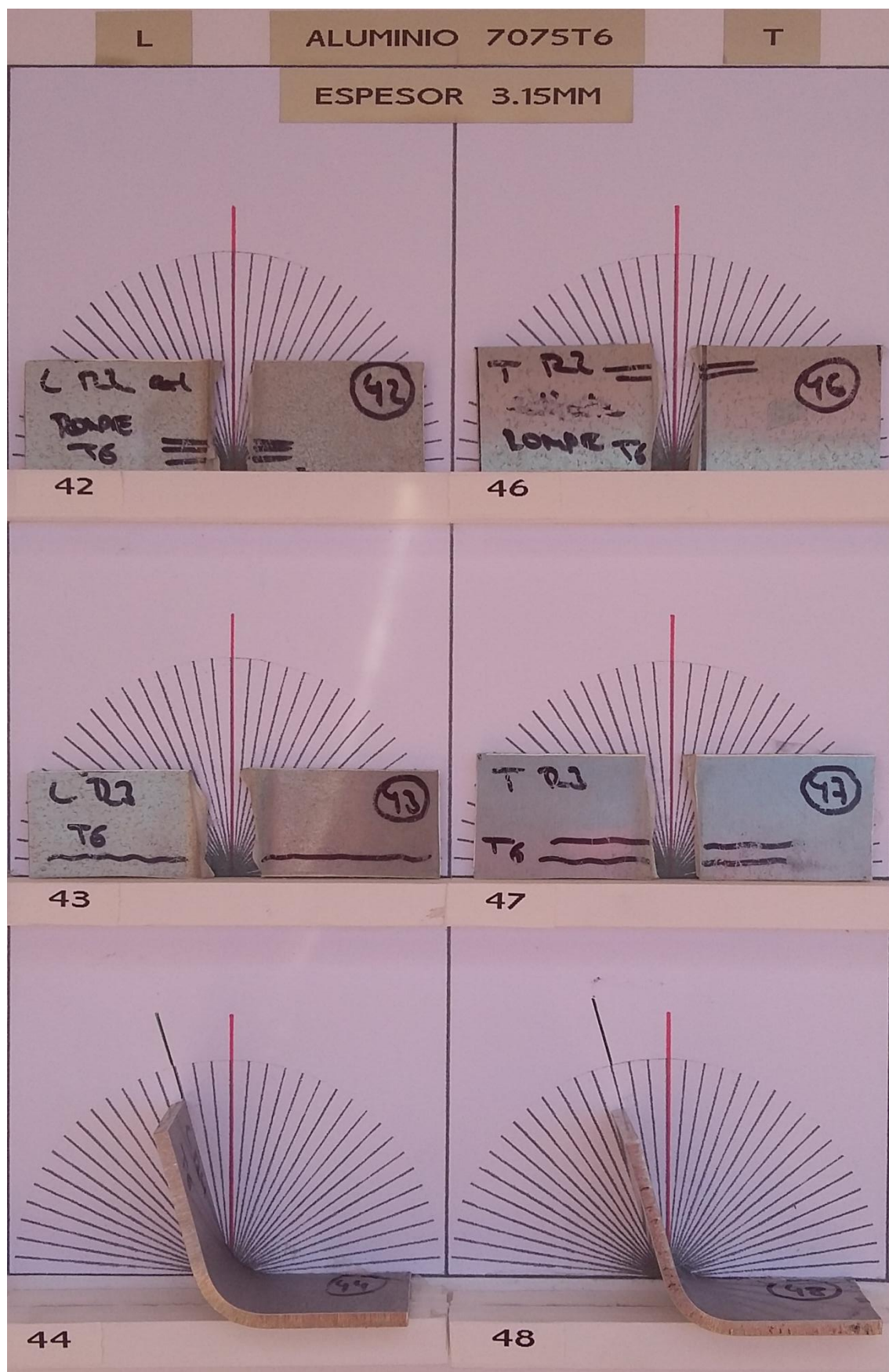


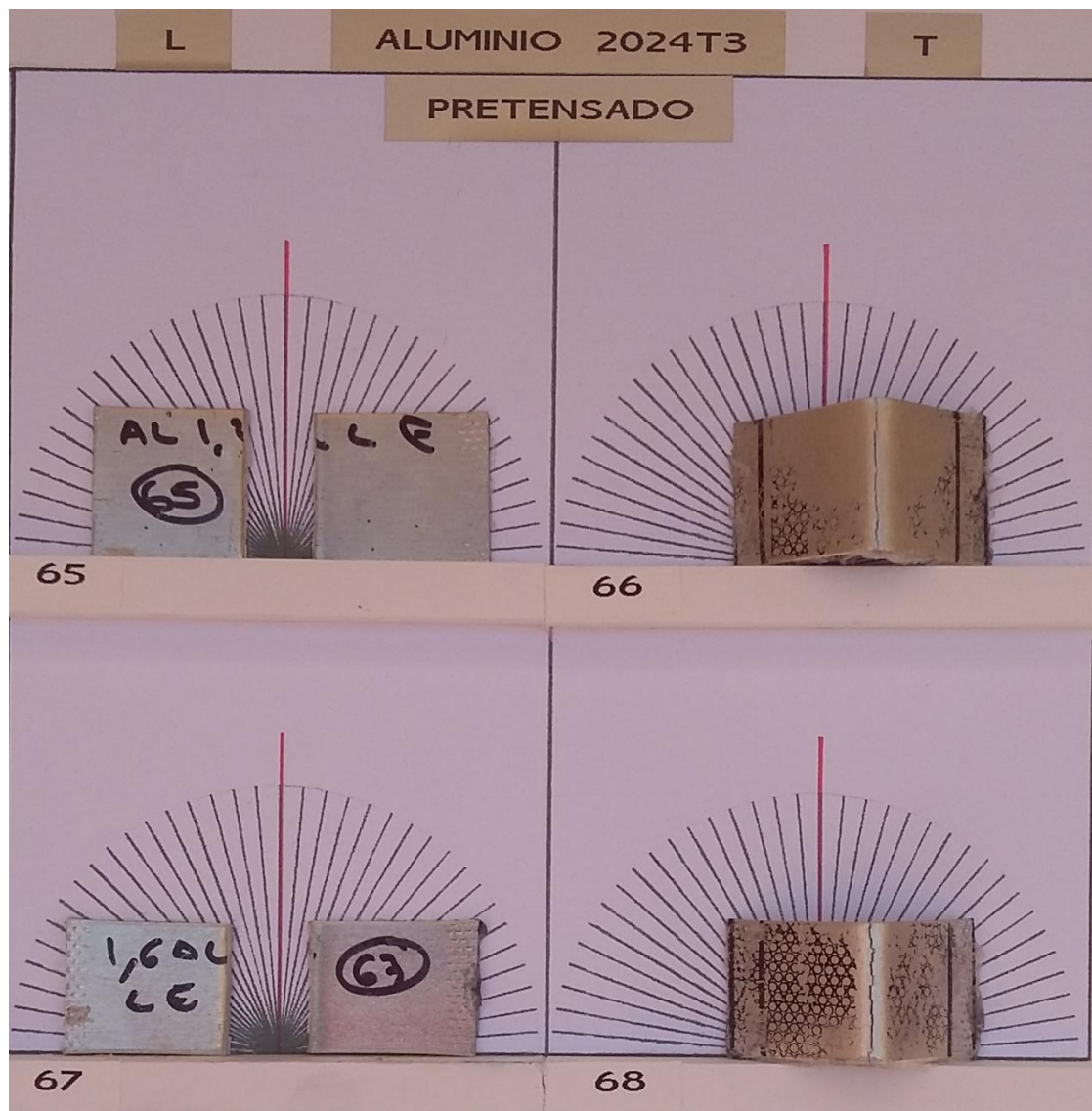


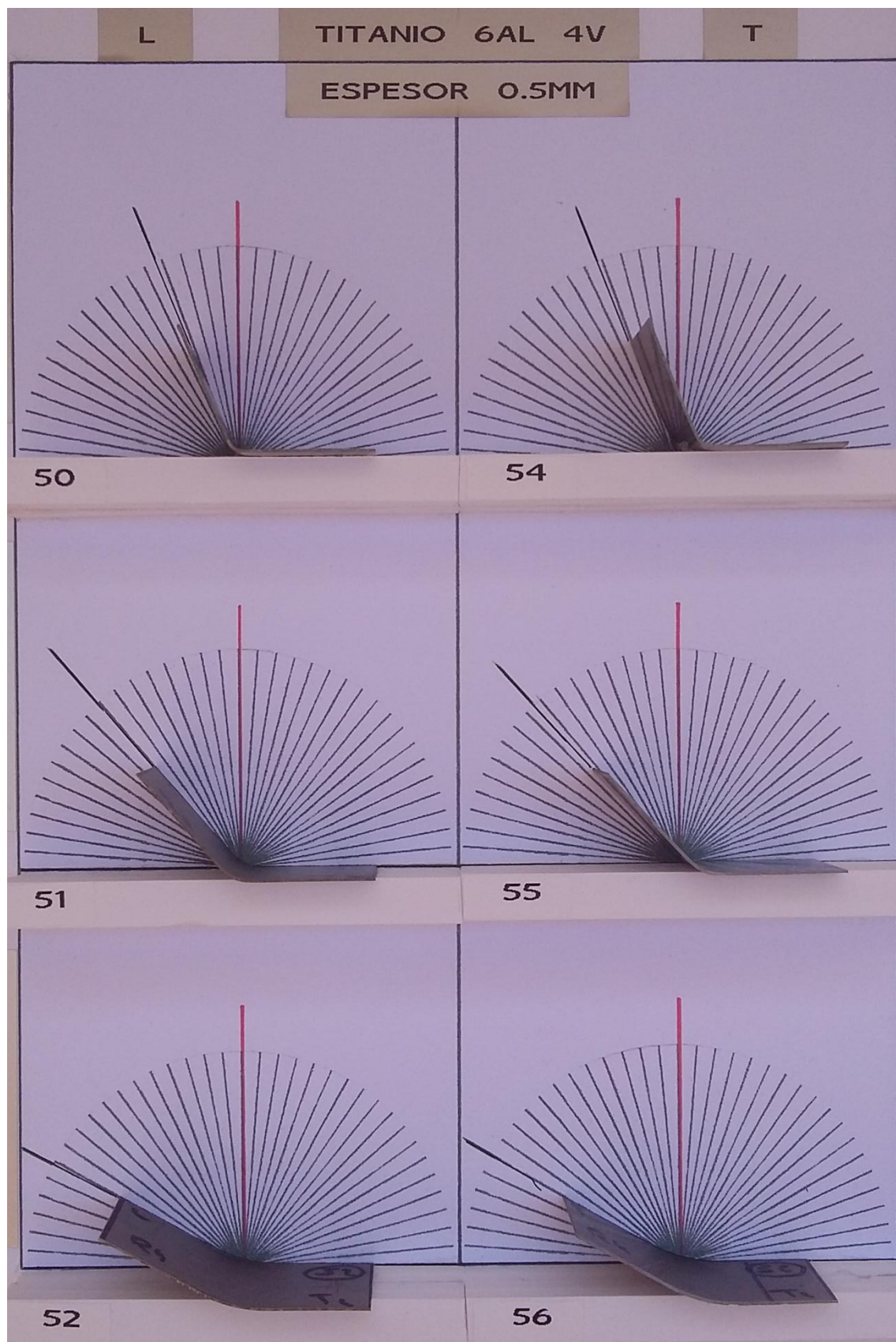












Anexo III

Análisis en profundidad del radio de doblado

En teoría se ha visto que:

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)}{1/\rho_i} = \frac{\rho_i}{\rho_f} - 1 \quad (A.1)$$

Donde $\rho = R + t/2$, suponiendo que la línea neutra permanezca en la línea media de la chapa.

Si se coge ahora ecuación (2.6.10) de los radios para ponerla en función de la curvatura, despreciando el término cúbico, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\rho_i - t/2}{\rho_f - t/2} = -3 \left(\frac{R_i S}{t E} \right) + 1 \quad (A.2)$$

Haciendo una serie de cálculos sencillos se llega a:

$$\frac{\rho_i}{\rho_f} - 1 = -3 \left(\frac{R_i S}{t E} \right) \left(1 - \frac{t}{2\rho_f} \right) = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)}{1/\rho_i} \quad (A.3)$$

Por otra parte, si se intenta poner en la ecuación (2.6.10) R_i/R_f en función de ρ , realizando una serie de operaciones, se obtiene la siguiente ecuación de recta:

$$\frac{R_i}{R_f} = -3 \left(\frac{\rho_i S}{t E} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{S}{E} \right) + 1 \quad (A.4)$$

Si se compara la ecuación (A.4) con la ecuación (3.1.1), se ve una clara semejanza entre ambas, a diferencia del término constante que introduce la (A.4). Sabiendo que ésta última es una ecuación que proviene de la experimentación, a diferencia de la otra que viene deducida de un análisis teórico, sería interesante analizar con más detenimiento si existiría una estrecha relación entre la constante de la ecuación (A.4) y la que se ha deducido en las consecuencias del Capítulo 6 de este trabajo, que pudiera falta a la ecuación (3.1.1). Indagando un poco más, se deduce que esta constante de la que se hace referencia sería un valor que dependería de las propiedades del material (S y E).

Si se retoman las gráficas de los dos aluminios 2024T3 (de 1,2 mm y 1,6 mm de espesor) y la del titanio (Figura 4.2.4, Figura 4.2.5 y Figura 4.2.14, respectivamente), se toma el valor de n de cada una de ellas, constante en la ecuación de la recta, y se divide entre las propiedades del material para cada caso (S/E), el valor que resulta de esta operación, en ambos materiales con propiedades muy diferentes, es un valor próximo a 17.

Representando en este caso la grafica de los radios finales e iniciales con respecto a ρ/t , tal y como se hacía con los ángulos en el epígrafe 2.4, se descubre que existen diferencias entre la ecuación teórica y práctica, pero que desaparece esa constante que las diferenciaba en la representación angular.

A continuación, en la Figura A.2, se muestra la representación gráfica de los R_f/R_i teóricos y experimentales con respecto a ρ/t , en el caso del titanio. En la Tabla A.1 se muestran los valores representados en la gráfica de la Figura A.1.

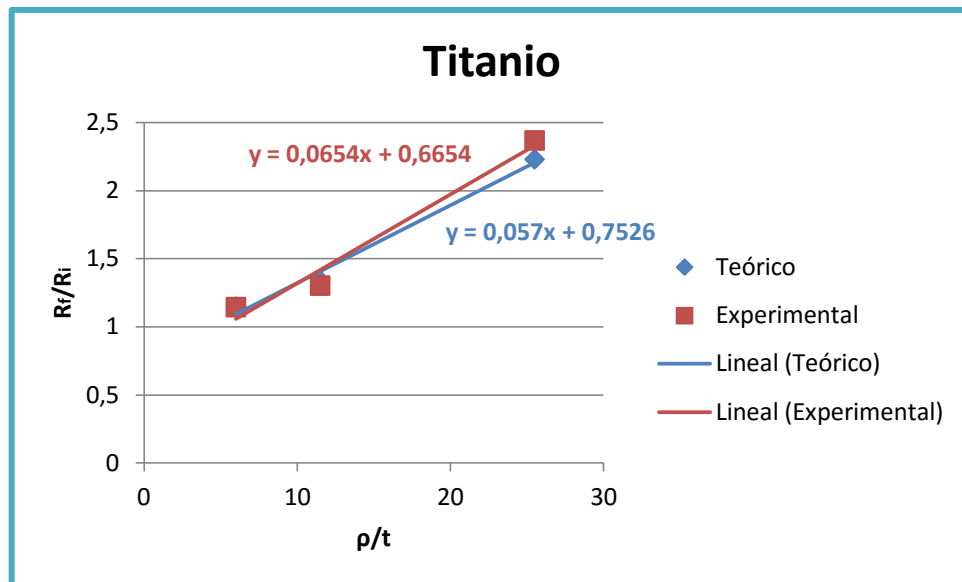


Figura A.2. Representación de R_f/R_i con respecto a ρ/t para el titanio.

Tabla A.1. Valores representados en la Figura A.2.

Titanio	
ρ/t	R_f/R_i
Teórico	
6	1,1455
11,5	1,3382
25,5	2,2272
Experimental	
6	1,1418
11,5	1,3
25,5	2,3656

Se anota que se ha escogido para analizar los materiales donde se veía más claramente el paralelismo que existía en las gráficas, y la representación del material que experimentaba mayor ángulo de recuperación, con el fin de que pequeños fallos experimentales no dieran errores cualitativos en las gráficas.

Un anexo digno de seguir en proceso de estudio.